

Diseño y modelado de vida útil de estructuras de hormigón: antecedentes, desarrollos e implementación

M. G. Alexander^{1*}

* Autor de Contacto: mark.alexander@uct.ac.za

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.325>

Recepción: 21/03/2018 | Aceptación: 05/07/2018 | Publicación: 31/08/2018

RESUMEN

Se presenta una visión general internacional del conocimiento actual y el progreso en el diseño de vida útil y el modelado de estructuras de hormigón. Explora por qué es necesario el modelado de la vida útil e indica que las demandas modernas de longevidad, durabilidad y sostenibilidad de las estructuras de hormigón no pueden cumplirse sin un modelo de vida útil. Aborda los enfoques actuales del diseño y la especificación de la durabilidad y concluye que es imperativo avanzar hacia enfoques basados en el desempeño para avanzar. Se citan ejemplos de la experiencia internacional para ilustrar el progreso que se ha logrado. Por último, el documento discute formas de avanzar, reconociendo que las bases filosóficas ya están en su lugar en formulaciones de códigos generales, pero que deben convertirse en enfoques útiles.

Palabras clave: modelado de vida de servicio; especificaciones basadas en el desempeño; durabilidad del concreto; indicadores de durabilidad; código modelo.

Citar como: M. G. Alexander (2018) “*Diseño y modelado de vida útil de estructuras de hormigón: antecedentes, desarrollos e implementación*”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 224-245, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.325>

¹ CoMSIRU, Department of Civil Engineering, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2019.

Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation

ABSTRACT

The paper presents an international overview of current knowledge and progress in service life design and modelling of concrete structures. It explores why service life modelling is needed, and indicates that modern demands for longevity, durability, and sustainability of concrete structures cannot be fulfilled without service life modelling. It addresses the current approaches to durability design and specification and concludes that a move to performance-based approaches is imperative for progress to be made. Examples from international experience are cited to illustrate progress that has been made. Lastly, the paper discusses ways of moving forward, recognizing that the philosophical bases are already in place in the form of general code formulations, but which need to be converted into useful approaches.

Keywords: service life modelling; performance-based specifications; concrete durability; durability indicators; model code.

Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação

RESUMO

O artigo apresenta uma visão internacional do conhecimento atual e do progresso na modelagem de um projeto de vida útil de estruturas de concreto. Explora porque a modelagem da vida útil é necessária e mostra que as demandas modernas de longevidade, durabilidade e sustentabilidade das estruturas de concreto não podem ser atendidas sem uma correta modelagem da vida útil. Discute as abordagens atuais de projeto e especificação da durabilidade e conclui que uma mudança para uma abordagem baseada em desempenho é imperativa para que um desenvolvimento significativo seja logrado. Exemplos da experiência internacional são citados para ilustrar o progresso que tem sido obtido. Por último, é discutido como avançar, reconhecendo que as bases filosóficas já estão em vigor na forma de formulações gerais nas normas prescritivas e de desempenho, mas que precisam ser transformadas em abordagens úteis ao exercício profissional.

Palavras-chave: modelagem do projeto de vida útil; especificações baseadas em desempenho; durabilidade do concreto; indicadores de durabilidade; norma modelo.

1. ¿INTRODUCCIÓN - porque la necesidad de modelar la vida útil de proyecto VUP?

Las Estructuras de concreto se pueden deteriorar prematuramente, resultando en bajo desempeño frente a la durabilidad. Las razones incluyen un mal entendimiento de los procesos de deterioro, evaluación equivocada de la agresividad local, y cambios en las propiedades del cemento y prácticas de construcción con el tiempo (Neville, 1987). Los problemas de durabilidad en estructuras de concreto cubren una vasta gama incluyendo agentes agresivos externos (por ejemplo, sulfatos), incompatibilidades de material interno (por ejemplo, reacción álcali agregado) y ambientes agresivos tales como aquellos sujetos a la acción de hielo - deshielo. La mayor amenaza al concreto armado es la corrosión de la armadura, llevando a la formación de fisuras, manchas y desprendimiento del recubrimiento de concreto como se aprecia en la figura Fig. 1. Eso puede comprometer la funcionalidad de las estructuras, comprometer la seguridad, la estabilidad y la estética. Tales estructuras se vuelven un pasivo indeseable para sus propietarios o

Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação

gestores, resultando en pérdidas económicas sustanciales, además de ser insustentables por desperdiciar recursos naturales valiosos.



Figura 1. Daños causados por corrosión en un puente de concreto expuesto a la brisa marina (cloruros) cercano a la costa de la Ciudad del Cabo en África del Sur.

Actualmente está ocurriendo una “crisis de durabilidad del concreto”. Eso tiene varias consecuencias: para propietarios de la infraestructura que exigen cada vez más tiempo de vida útil; por el imperativo de una gestión adecuada de financiamiento de infraestructuras públicas; y para el desarrollo de soluciones de ingeniería que establezcan una base de confianza en la provisión futura de la infraestructura. Esas consecuencias son serias y necesitan de atención continua y urgente de la comunidad del concreto.

1.1 Durabilidad y corrosión de estructuras de concreto armado

Como se ha mencionado la mayor amenaza a la durabilidad del concreto armado es la corrosión de la armadura. La corrosión es iniciada por una alteración en la solución del poro alrededor del acero, debido tanto a la acidificación por carbonatación, como a la entrada de iones cloruro de la brisa marina del ambiente cercano a la costa. La armadura es protegida del medio ambiente por una capa de recubrimiento de concreto relativamente fina, que debe "garantizar" la vida útil de la estructura. La durabilidad es controlada por la calidad del concreto de recubrimiento, que es susceptible a influencias de deterioro de un curado insuficiente, secado precoz, compactación inadecuada, y la penetración de agentes ambientales agresivos. El problema de la durabilidad en estructuras de concreto depende en gran parte de la calidad del concreto y del espesor de su capa de recubrimiento, que es función de una decisión de proyecto y un correcto procedimiento de ejecución. La Fig. 2 presenta un esquema de la capa de recubrimiento del concreto, ilustrando los elementos más importantes.

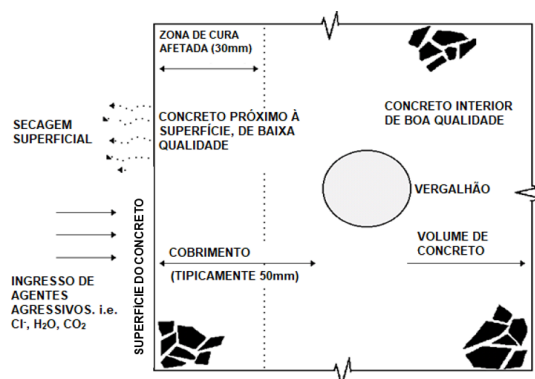


Figura 2. Esquema de los factores relevantes de la calidad del concreto y de su espesor de recubrimiento

Consecuentemente, las estrategias de durabilidad que probablemente proporcionarán los mayores beneficios deben abordar directamente la calidad y el espesor del concreto de recubrimiento de la

armadura. “Calidad” se refiere principalmente a la capacidad de resistir a penetración de fluidos/gases agresivos a partir del ambiente externo, que es una función del tipo de aglomerante y de la relación agua/aglomerante, suponiendo que el curado es efectivamente realizado (¡una premisa falsa, en muchos casos!). El sistema aglomerante es importante porque su composición química participa en la interacción y la inmovilización de iones agresivos, como los cloruros. Para los proyectistas, eso está relacionado a dos aspectos: la capacidad de (1) cuantificar las propiedades del espesor de recubrimiento para fines de especificación y (2) realizar la previsión de la vida útil de proyecto VUP, lo que significa prever un margen de deterioro de una estructura de concreto. Para los constructores, la cuestión es seleccionar los materiales y proporciones de concreto apropiados e implementar locales adecuados que garanticen que las propiedades del concreto de recubrimiento especificadas sean alcanzadas en la construcción real.

1.2 Vida Útil de Proyecto VUP

Los ingenieros necesitan de herramientas para modelar o prever el deterioro de las estructuras de concreto a lo largo de su vida útil. El denominado “Service Life Modeling” (SLM) o Modelaje de la Vida Útil se destina a permitir la cuantificación de la vida útil de proyecto de estructuras, para fines de optimización económica, eficiencia operacional y desempeño estructural y estético. Es así que el “modelaje de la vida útil” SLM y el “proyecto de vida útil” están íntimamente relacionados: el proyecto racional necesita de buenos modelos y los modelos alimentan el proyecto (modelos también son usados para otros fines, como pesquisa y diagnóstico).

La norma de Modelo de Previsión de Vida Útil de Proyecto (*fib*, 2006) define “Vida útil de proyecto” como el período asumido para el cual una estructura ó parte de ella es usada para el propósito pretendido, donde:

- hay deterioro y el desempeño del material es cuantificado tanto como sea posible (incluyendo cinética del proceso)
- es adoptado un enfoque adecuado de riesgo, generalmente basado en la probabilidad que lleve a medidas de confiabilidad
- cuantificaciones, costos, intervenciones (por ejemplo, mantenimiento) y similares pueden ser racionalmente considerados.

Aun cuando el entrenamiento y la experiencia de los ingenieros estructurales se concentren principalmente en aspectos físicos y mecánicos de proyecto y de la especificación, la "nueva demanda" es una caja de herramientas más incluyente, conteniendo datos para soluciones prácticas de problemas de deterioro basado en el tiempo. Esto también debe incluir previsiones para deterioro y costos de mantenimiento que pueden ser sustanciales, fácilmente llegando a varios puntos porcentuales del PIB, y frecuentemente excediendo 50% de los presupuestos totales de la construcción. Hoy en día, mucha tecnología y conocimiento es exigido de los ingenieros modernos, y el modelaje de la vida útil es una de esas "nuevas" demandas.

2. ¿COMO PROYECTAR PARA CONSIDERAR LA VIDA ÚTIL DE PROYECTO?

¿Prácticamente, proyectar para una vida útil de proyecto de 50 o 100 años cuando no hay evidencia objetiva sobre en que basar nuestras decisiones? La implementación del “modelaje de la vida útil – SLM” racional es compleja y depende de los ambientes de exposición (por ejemplo, calentamiento global, cambio rápido de materiales como cementos más nuevos), conocimiento y modelos inadecuados, calidad de construcción variable, percepciones diferentes de lo que significa “vida útil” y la imposibilidad de verificar los proyectos a largo plazo. ¡Claramente el problema no es simple! Un ejemplo histórico es la Casa Coignet en Paris, Francia, mostrada en la Fig. 3. Esta fue probablemente la primera casa de concreto armado, construida en 1853, y ahora

con más de 160 años. Para colocar esto en el contexto: ¿cómo esa casa debería haber sido proyectada en el siglo XIX para adecuarse a las exigencias del siglo XXI? Mucho podría cambiar durante la vida útil de una estructura que podría hacer los mejores intentos iniciales de SLM insignificantes.



Figura 3. Coignet House a las afueras de Paris, Francia (4 pisos). Considerada la primera casa en concreto armado del mundo, 1853. Mortero o concreto primitivo con arcilla calcinada mezclada con cal.

La vida útil de una estructura de concreto es ilustrada esquemáticamente en la Fig. 4, que muestra el progreso del deterioro a lo largo del tiempo de una estructura (A), a medida que ella comienza a deteriorarse a partir de su condición inicial construida (el tiempo cero). Idealmente, el tiempo en que la estructura alcanza un nivel inaceptable de daño debe ser igual o superior a la vida útil de proyecto y debe ser capaz de ser modelado. No obstante, muchas estructuras se deterioran prematuramente, como en (B) en la Fig. 4, presentando durabilidad inadecuada y rápido deterioro, exigiendo rehabilitación durante su vida útil. Ese deterioro muchas veces no es esperado, lo que ilustra la necesidad de prever con mayor precisión el desempeño de las estructuras de concreto durante su vida útil. La creciente frecuencia de manifestaciones patológicas precoces y los costos de reparación asociados demuestran que los propietarios de la infraestructura exigen que los proyectistas y constructores ofrezcan garantía de una vida útil de proyecto, preestablecida, de forma más precisa y confiable, conduciendo a estructuras durables sin sobresaltos y reparaciones no previstas.

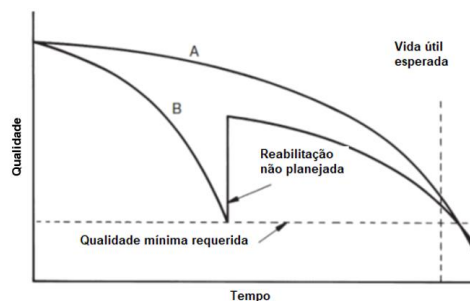


Figura 4. Ilustración esquemática del concepto de “vida útil” de una estructura

Resumiendo: la construcción de la vida útil de proyecto, VUP, requiere modelaje de la vida útil y predicción de la vida útil. La vida útil debe atender a un estado límite de durabilidad, que aún no fué definido en normas, adherido al estado límite de servicio. Por lo tanto, en el contexto de este artículo, es necesario revisar los criterios, requisitos y procedimientos de proyecto y de especificación actualmente adoptados en nuevas obras.

2.1 Proyecto de durabilidad actual y especificaciones

El proyecto de durabilidad de las estructuras de concreto armado es el proceso de determinar la combinación más adecuada de materiales y detalles estructurales para garantizar la durabilidad

(con facilidad de mantenimiento) de la estructura a lo largo de su vida útil y en su ambiente de proyecto (Alexander & Santhanam, 2013). Eso debe ser enmarcado en términos de confiabilidad aceptable ó probabilidad de la estructura poder funcionar satisfactoriamente. El problema incluye el balance entre el riesgo de deterioro indebido con la economía de garantizar durabilidad y puede incluir mantenimiento y reparaciones planificadas. Las especificaciones de durabilidad están íntimamente ligadas al proyecto. La especificación establece requisitos para garantizar que la estructura sea construida de acuerdo con la intención del proyecto y debe ofrecer informaciones claras sobre la naturaleza deseada o sus resultados de la construcción.

Existen dos tipos principales de especificaciones o normas:

1. Prescriptivas, estableciendo métodos, materiales, procesos y procedimientos que instruyan exactamente como realizar el trabajo. El constructor tiene pocas opciones y debe simplemente ejecutar las instrucciones de especificación, dejando poco espacio para la innovación.
2. Desempeño, delineando lo que es necesario como un producto acabado, es decir, los resultados deseados de la construcción, definiendo esos resultados claramente en términos de criterios de desempeño mensurables por ensayos y simulaciones.

2.1.1 Crítica a los procedimientos actuales de proyecto de la vida útil

Actualmente, hay pocos proyectos de durabilidad realmente desarrollados para estructuras de concreto. Cualquier proyecto de durabilidad es generalmente limitado a especificaciones vagas (o, especificaciones complejas e irrealizables), con la esperanza de que, si la especificación fuese respetada, la durabilidad de la estructura será asegurada (es decir, un enfoque "de recetas" "ó prescriptiva" o "considerada a satisfacer" del *fib* Model Code 2010).

Además de eso, muchas especificaciones de durabilidad son frecuentemente basadas en enfoques anticuados y suposiciones irrealistas. No obstante, existen algunos ejemplos notables de proyectos racionales de durabilidad (ver, por ejemplo, Parte III [Alexander, 2016A]) que lidia con estudios de casos prácticos como el puente Confederación de Canadá; de la Marina en la región del Golfo; los puentes daneses de Pasaje del Estrecho; el proyecto Hong Kong-Zhuhai-Macau Sea Link; y el nuevo Canal de Panamá.

La práctica actual considera que la resistencia a la compresión es el factor crucial, muchas veces usado como sustituto para la durabilidad (Alexander et al., 2008). No obstante, diferentes métodos para obtener la misma resistencia del concreto no resultan de la misma durabilidad. Además de eso, la resistencia de muestras de laboratorio bien compactadas y correctamente curadas no reflejan los procesos de construcción como lanzado, compactación y curado que afectan la calidad del recubrimiento de concreto. Los factores importantes de control del rango de deterioro son los constituyentes del material de concreto, la calidad del concreto de recubrimiento y la agresividad del ambiente. Generalmente, es inviable controlar ó modificar las condiciones de exposición. Por tanto, las estrategias para mejorar la vida útil deben concentrarse en los materiales y en la calidad de la construcción. Tales estrategias requieren modelos de vida útil y especificaciones de desempeño y de durabilidad adecuadas (Mackechnie & Alexander, 2002). esos desarrollos facilitan el proyecto de durabilidad innovador y sensato, que está en gran parte ausente en el momento.

2.2 Necesidad de un nuevo enfoque: de proyecto y especificación prescriptivos al proyecto por desempeño

Existen esfuerzos internacionales concentrados para separarse de normas prescriptivas y normas por desempeño. Por ejemplo, la iniciativa P2P del Nacional Ready Mix Concrete Association (NRMCA) de los EUA y del programa francés PERFDUB (Linger & Cussigh, 2018). Hay grandes beneficios en migrar de norma prescriptiva para normas basadas en desempeño (Simons, 2004, Día, de 2005, Bickley et al, 2006). De manera general, aunque la filosofía de

especificaciones basadas en el desempeño esté bien establecida (Wolf et al, 2005, CAN / CSA, 2004), la divergencia permanece en definiciones adecuadas y medidas confiables de parámetros de calidad.

Métodos de ensayo apropiados son cruciales, y sin estos, poco progreso real podrá ser hecho. Los enfoques de ensayo fueron revisadas por el RILEM TC-NEC (RILEM, 2005), y otros desarrollos pueden ser esperados. Aun cuando algunos ensayos estén bien establecidos, como el ensayo de permeabilidad a cloruros (ASTM C1202, 2010), el desafío consiste en crear y estandarizar nuevos métodos de ensayo.

2.2.1 Crítica de las especificaciones prescriptivas

El concreto estructural es proyectado para atender a criterios específicos de trabajabilidad, resistencia, durabilidad y así sucesivamente. Tal como fue indicado, las especificaciones actuales son en gran parte prescriptivas, que establecen los valores para los parámetros limitantes, tales como: consumo mínimo de ligante ó cemento, relación agua/ligante máxima, resistencia mínima a compresión, cantidad máxima ó mínima de aire aprisionado, entre otras.

Especificaciones prescriptivas generalmente son oscuras en aspectos como condiciones de exposición para la estructura. Estas son consecuencia de una experiencia anterior en que la complejidad del material era menor y la durabilidad no era la cuestión crítica que es ahora. Su principal desventaja es que ellas especifican parámetros que son generalmente inverificables en la práctica, por tanto, no pueden ser verificados objetivamente. Normalmente en las obras, solo la resistencia a la compresión es la medida para garantizar la conformidad con los requisitos de proyecto. Inclusive en ese caso, las probetas son producidas y ensayadas bajo condiciones de exposición de poca similitud con aquellas que la estructura real está sometida.

Tomando la resistencia a la compresión como un referencial para la durabilidad, se ignora el hecho de que la resistencia y la durabilidad no estén, necesariamente, directamente relacionadas. Por ejemplo, el ensayo de resistencia a la compresión no es capaz de explicar la natural fisicoquímica de diferentes ligantes y su resistencia a los efectos agresivos del ambiente. Además de eso la resistencia es regulada por el volumen de vacíos interno del concreto en el núcleo, ni siempre la principal variable de durabilidad, una vez que lo importante es el concreto de la superficie correspondiente al espesor de recubrimiento. Este concreto es críticamente afectado por la colocación, lanzado, compactación y curado. Una medida confiable de la calidad de la zona de recubrimiento solo puede ser obtenida evaluándose el concreto posteriormente al endurecimiento de la estructura, y no en las muestras de resistencia.

La eventual conexión entre la durabilidad y la resistencia a la compresión viene dada en la Fig. 5, que muestra correlaciones entre un parámetro de durabilidad OPI, índice de permeabilidad al oxígeno (escala log) medidos en las estructuras existentes, y la resistencia a la compresión medida en cubos de laboratorio, vaciados y curados en las condiciones estándares. ¡Como se muestra, está claro que no hay correlación! Ello ilustra que las mediciones en las estructuras existentes son la única manera confiable de evaluar y verificar la durabilidad del concreto.

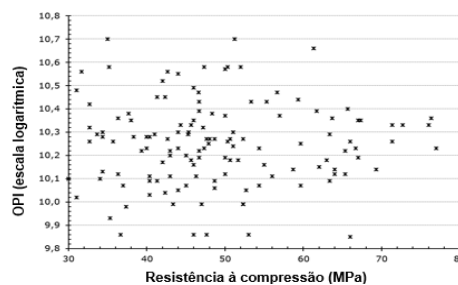


Figura 5. Falta de correlación entre la resistencia a la compresión estándar y la permeabilidad al oxígeno medidas en estructuras reales (Nganga et al, 2013)

Day (2005) sugiere que las especificaciones prescriptivas brindan poca ventaja al productor de concreto, porque limitan la extensión en que los desarrollos más recientes en tecnología de materiales y técnicas de dosificación de mezcla pueden ser aplicados. Simplificando, las especificaciones prescriptivas sofocan la innovación en la fabricación y en el uso del concreto.

No obstante, lo expuesto, algunos elementos de especificaciones prescriptivas aún son útiles, para orientación en procesos como compactación y curado. En la práctica, y el futuro previsible, un enfoque híbrido para las especificaciones, con mayor énfasis en criterios de desempeño, es adecuada cuando el propietario y proyectista deciden juntos sobre el nivel de desempeño deseado en el ambiente de servicio y propongan ensayos comprobatorios (ver más adelante), que son usados para respaldar las especificaciones. El proveedor y el contratado ofrecen entonces un sistema de concreto (precalificado, utilizando ensayos realizados antes de la construcción real) que satisfaga los parámetros o límites definidos por el propietario / proyectista. El “sistema concreto” no solo describe los requisitos, sino que también alcanza los procedimientos de vaciados de concreto adoptados.

2.2.2 Especificaciones basadas en el desempeño

La discusión anterior indica deficiencias en las especificaciones prescriptivas y aumenta la importancia de que los principales parámetros relacionados a la durabilidad sean medidos en las construcciones existentes, es decir ya terminadas. Así las especificaciones basadas en desempeño están tomando terreno, lo que ayuda a evaluar y garantizar el nivel necesario de calidad del concreto para durabilidad a largo plazo en el ambiente de servicio ofrecido.

Lobo et al. (2005) describen las especificaciones de desempeño como “un conjunto de instrucciones claras, mensurables y realizable que describen los requisitos funcionales específicos de la aplicación para el concreto endurecido”. Las especificaciones basadas en desempeño también cambian los responsables que en general, son apenas el proyectista y el constructor. En una especificación prescriptiva, el principal riesgo es colocado sobre el propietario y proyectista, en cuanto especificaciones por desempeño coloca la responsabilidad al propietario, el proyectista, el productor de concreto, y a los constructores (Taylor, 2004).

La principal desventaja de las especificaciones basadas en desempeño y la falta de concordancia, consistencia o estandarización en ensayos para medir las propiedades del concreto de recubrimiento. Por ejemplo, la EN 206-1 (2013), que trata de la especificación, desempeño, producción y conformidad para la construcción de concreto, “evita” el enfoque basado en el desempeño con base en la falta de acuerdo sobre los métodos de ensayo. Como es argumentado anteriormente, la resistencia a la compresión no es un indicador adecuado de durabilidad. En vez de eso, son necesarios ensayos y parámetros que indiquen los factores de deterioro, como los constituyentes del material, la calidad del concreto acabado y la agresividad del ambiente. Por lo tanto, las especificaciones de durabilidad deben basarse en la medición de las propiedades de transporte del concreto y el espesor de recubrimiento. Esos enfoques abren el camino para la elaboración de especificaciones de desempeño innovadoras.

Resumiendo: la clave para mejorar la durabilidad del concreto armado es exigir que las estructuras construídas atiendan a ciertos criterios críticos de desempeño en términos de probables modos de deterioro, notoriamente la corrosión de la armadura. El objetivo es garantizar que la estructura, durante su vida útil, no se aproxime al “estado límite” además de lo cual la capacidad funcional de la estructura quedaría comprometida. El objetivo de las especificaciones basadas en desempeño es garantizar que una probabilidad aceptable de desempeño sea alcanzada. El cambio de especificaciones prescriptivas para especificaciones de desempeño es uno de los pasos importantes y necesarios para enfrentar las deficiencias que son frecuentemente aparentes en la actual construcción de concreto armado.

2.2.3 Indicadores de durabilidad ó índices de durabilidad

El concepto de “indicadores ó índices de durabilidad” (DIs) originado a partir de los trabajos realizados en la década de 2000 (Andrade e Izquierdo, 2005; Alexander et al, 2001 y Baroghel-Bouny, 2004), todos proponiendo el uso de indicadores ó índices para control de durabilidad. Estos DIs pretenden describir y, por lo tanto, controlar una serie de problemas de deterioro e incluyen parámetros físicos, químicos y electroquímicos. Generalmente descrito con base en la propiedad de transporte ó mecanismo de deterioro y puede ser utilizado para caracterizar el concreto en términos de su durabilidad “potencial” (Alexander et al, 2017).

Se refiere al potencial para que el concreto de ser durable en el ambiente considerado, desde que sea debidamente proporcional como los constituyentes correctos y seguidamente el curado bien hecho. Para obtener estructuras de concreto durables usando este concepto, varios parámetros son necesarios para servir como “índices” de durabilidad del material o la estructura. Al medirlos a corto plazo, ellos pueden ser usados como indicadores del probable desempeño de durabilidad de la estructura a largo plazo. Deben ser parámetros fundamentales del material relacionados a los mecanismos de transporte y a los procesos de deterioro. Estos parámetros deben ser mensurables en ensayos simples, rápidos y precisos en el sentido de que ellos correctamente puedan representar el problema durabilidad efectivamente. Dicha efectividad de los indicadores o índices debe ser evaluada por ensayos *in loco* a lo largo de la vida útil de la estructura (Alexander & Ballim, 1993).

2.3 Previendo y Modelando la Vida Útil de Proyecto

El modelaje de la vida útil para estructuras de concreto armado involucra cálculos cuantitativos o estimados para prever el tiempo de aparición daños inaceptables (por ejemplo, fisuras, corrosión, pérdida de sección, etc.) para un determinado ambiente. Los modelos de vida útil son generalmente de natural semi empírica, basados en datos de laboratorio y de campo, que son necesarios para la calibración. Alternativamente, SLMs pueden ser construidos a partir de conceptos básicos, usando modelos de transporte iónico y principios de flujo en medios porosos (Van der Lee et al., 2008). Esos modelos representan los aspectos de “interacción-transporte” del fluido o del flujo iónico en el concreto, con enfoques basadas en principios termodinámicos y geoquímicos (Guillon et al, 2013). No obstante, dichos modelos no son necesariamente más precisos o confiables en sus previsiones, y la complejidad adicional ni siempre justifica los resultados obtenidos. En cualquier caso, esos modelos también deben ser calibrados con datos laboratoriales y de campo, es aquí que reside el problema: en casi todos los casos, los concretos de un trazo son únicos y necesitan ser probados en ambientes apropiados para coleccionar datos que pueden ser usados para calibrar o construir el modelo. Los SLMs también son útiles en el “retro-análisis de estructuras existentes cuando la penetración de contaminantes, como los cloruros, es conocida por concreto y ambientes específicos en un determinado momento; entonces es posible usar el modelo para determinar el tiempo de corrosión necesario para afectar. Para un enfoque probabilístico completa, la variabilidad también debe ser considerada (Muigai, et al, 2009).

2.3.1 El modelo de vida útil conceptual de dos etapas

El aceptado "modelo" conceptual para la vida útil es el modelo de dos etapas propósito por Tuutti (Tuutti, 1992) para el caso de la corrosión de armaduras. El deterioro es concebido en dos fases distintas, la fase de iniciación y la fase de propagación - ver la Fig. 6. Durante el período de iniciación, hay una penetración de los agentes agresivos. La duración de este período depende de la calidad del concreto, el espesor de recubrimiento, de las condiciones de exposición y del umbral o concentración crítica necesaria para iniciar la corrosión.

Una vez desavisado el acero, se considera que hubo el comienzo de la segunda fase de propagación de la corrosión. La Fig. 6 muestra la propagación y ese período puede aún ser

subdividido en diferentes estados límite, como manchas, fisuración debido a productos de corrosión, delaminación por expansión y posible colapso final de la estructura.

2.3.2 Modelos prácticos de vida útil

Varios modelos de vida útil existen en diferentes partes del mundo, en gran parte como respuesta a las condiciones ambientales en varias localidades donde los SLMs fueron desarrollados. La mayoría de los modelos cubre la penetración de cloruros y del dióxido de carbono en el concreto, como un modelo europeo "DuraCrete" (DuraCrete, 1998) y el norteamericano "LIFE-365" (2005). en África del Sur, los modelos de carbonatación e ingreso de cloruro también fueron desarrollados (Mackechnie & Alexander, 2002).

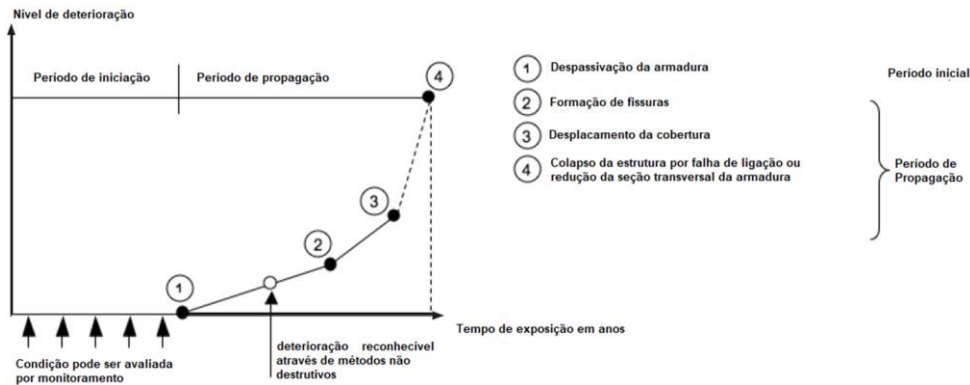


Figura 6. Modelo Tuutti de dos etapas

La Tabla 1 ofrece un resumen de algunos de los modelos de vida útil más prominentes disponibles en el momento. El modelaje de cloruros es comúnmente representado. (Mas detalles sobre SLMs son ofrecidos en la sección sobre esfuerzos internacionales).

Tabla 1. Resumen de algunos modelos de vida útil para concreto armado

Modelo	Características	Referencia
Life-365®	Modelo de difusión de cloruros, basado en la ley de Fick. Semi-probabilístico Ofrece análisis de costo del ciclo de vida.	Software gratuito. www.Life365.org
Stadium®	Modelo multi-iónico, basado en la ecuación de Nernst-Planck. Ofrece rango de entrada de cloruro e iniciación a la corrosión. También ofrece perfiles de carbonatación y sulfato. Probabilístico completo.	Proprietário do software: www.simcotechologies.com
fib Bulletin 34	Basado en la segunda ley de Fick. Aborda principalmente entrada de cloruro y carbonatación. Usado en fib Model Code 2010. Full probabilístico.	Bulletin para livre acesso: ISBN: 978-2-88394-074-1
Concrete Works	Basado en la ley de Fick. Prevee concentración, entrada de cloruro, caída térmica	www.texasconcreteworks.com (Folliard et al, 2008)
Clin Conc	Modelo de difusión de cloruro.	(Tang, 2008)

2.4 Esfuerzos internacionales en el desarrollo de SLMs y especificaciones basadas en desempeño

Esta sección describe los desarrollos en SLMs y especificaciones basadas en desempeño en varias partes del mundo. La mayoría de los modelos está preocupada con la previsión del inicio de la

corrosión del acero en el concreto y, por lo tanto, con la reacción del dióxido de carbono o cloruros, y la discusión será limitada a esos mecanismos de deterioro. Las observaciones generales son dadas primero, seguidas de detalles importantes para cada país o región.

Los modelos de previsión de cloruro europeo, escandinavos o sudafricanos son enfoques basados en el desempeño, es decir, estos son basados en la medición actual de las propiedades del material de la mezcla o estructura de concreto bajo consideración. El inicio de la corrosión es previsto usando la segunda ley de difusión de Fick, que permite modelar los perfiles de cloruro usando un coeficiente de difusión relevante, las condiciones de exposición y la concentración superficial del cloruro. Los coeficientes de difusión basados en varios materiales y proporciones de mezcla son experimentalmente determinados u obtenidos a partir de la experiencia.

Diferentes métodos de ensayo son usados en diferentes partes del mundo para estimar los coeficientes de difusión de cloruro. Los modelos europeos y escandinavos que usan la ASTM C 1202 (NTBUILD 492, 1999), en cuanto que el ensayo del índice de conductividad de cloruro (CCI) (Streicher y Alexander, 1995) es utilizado en África del Sur. Para los modelos de carbonatación, la resistencia a la carbonatación del concreto es generalmente encontrada en ensayos de carbonatación acelerada, normalmente usando especímenes curados en laboratorio.

Por otro lado, el modelo norteamericano "LIFE-365" es basado en simulaciones computacionales y no involucra ensayos. La vida útil y los costos del ciclo de vida de estructuras de concreto armado son estimados a partir de parámetros de entrada, como proporciones de mezcla y materiales, medidas preventivas (inhibidores de corrosión, revestimientos, acero inoxidable o revestido con epóxi) y condiciones ambientales. Diversos países alrededor del mundo adoptaron, en diferentes grados, el uso de especificaciones basadas en desempeño para la construcción en concreto, y ya serán discutidos.

2.4.1 *Canadá y Australia*

Bickley et al. (2006) hacen una breve revisión del uso de especificaciones de desempeño en Australia y en Canadá. Un factor común en esos países es el refinamiento de las definiciones de clases de exposición, permitiendo una descripción clara del tipo de desempeño deseado en una situación específica. Esa especificación de concreto australiana (AS, 2007) ofrece una clasificación especial que puede ser solicitada usando criterios de desempeño o preceptivos. De acuerdo con Day (2005), las especificaciones australianas proporcionan una buena plataforma para productores de concretos competentes. Un componente esencial de ese arreglo es la presencia de un sistema de calidad que monitorea el concreto y permite el control de desvíos. No obstante, el principal impulso de esas especificaciones aún es el control de la resistencia del concreto.

Las normas canadienses de concreto (CAN / CSA, 2004) tienen la opción de especificar criterios de desempeño o preceptivos. Las clases de exposición fueron extensamente definidas, y los límites son sugeridos para constituyentes o propiedades que llevaran a la producción de concretos durables para la condición de exposición específica. Esos límites pueden ser interpretados en especificaciones prescriptivas o de desempeño. En el primer caso, el cumplimiento de los límites sería necesario, en cuanto al segundo, los límites servirían como una directriz valiosa para el proveedor.

Bickley et al. (2006) indican que las normas canadienses usan requisitos de desempeño, tales como la carga total pasante (en Coulomb) para categorías especiales de exposición a cloruros, además de las dosis normativas rutinarias. Varios métodos de ensayo estandarizados están disponibles para usar en especificaciones de desempeño, es decir, la resistividad eléctrica (ASTM C1202, 2010), índice de vacíos (ASTM C457, 2010), sortividad (ASTM C1585, 2004), y difusión de iones cloruro (ASTM C1556, 2004). Esos ensayos pueden ser realizados en muestras moldeadas durante el vaciado o a partir de ensayos en probetas. No obstante, ni en todos esos ensayos son útiles para fines de control de calidad de rutina.

2.4.2 EUA

Como se ha mencionado, el modelo norteamericano de vida útil "LIFE-365" para cloruro es basado en simulaciones de computadora y no involucra ensayos directamente. Sin embargo, Thomas et al., (2012) mostraron que el modelo tenía previsto con éxito la penetración de cloruros en diferentes concretos en un local de exposición marina en Maine, EUA (Thomas et al, 2012, Alexander y Thomas, 2015). Para otros tipos de deterioro, Simons (2004) describió la experiencia con las especificaciones de desempeño en Nuevo México, donde también hay un alto riesgo de reacción álcali agregado del concreto. A partir de una especificación contra riesgo de AAR, hielo y deshielo y daños salinos relacionados, fueron desarrolladas especificaciones más recientes que abordan aspectos de variabilidad de los agregados, diferencias en los equipamientos y procedimientos operacionales y minimización de fisuras. Esto llevó a controles sobre la cantidad de cemento, bien sea como ganancia controlada de la resistencia del concreto. En las especificaciones más recientes, referidas al consumo mínimo de cemento, contenido máximo de agua y proporción arena-agregado fueron eliminadas, en cuanto ensayos apropiados para medir el potencial de AAR, permeabilidad y acción de hielo deshielo fueron delineados. Las especificaciones más antiguas no podían "garantizar" la protección contra los problemas de durabilidad, pues no había ensayos directos.

2.4.3 Escandinavia

En Escandinavia, el modelo "ClinConc" de ingreso de cloruro fue desarrollado (Nilsson et al, 1996, Tang, 2008). El modelo el transporte de cloruro en la estructura de poros de concreto, a partir del contenido de cloruros libres y el contenido de cloruros totales. Es, por lo tanto, un tipo de modelo de "transporte-interacción".

En Noruega, Gjörv, pionero en el enfoque de proyecto basado en probabilidad usando en DURACRETE para directrices de durabilidad, más expresado en un modelo basado en probabilidad llamado Duracon (Gjörv, 2014). Usando la segunda ley de Fick modificada en una simulación de Monte Carlo, se obtiene la probabilidad de corrosión durante un cierto "período de servicio" para la estructura en el ambiente dado, con los siguientes parámetros de entrada:

1. Carga ambiental: carga o concentración de cloruro, edad de actuación de cloruro y temperatura
2. Calidad del concreto: difusividad de cloruro, dependencia del tiempo de la difusividad del cloruro y contenido crítico de cloruro
3. Recubrimiento de concreto nominal

Un determinado "período de servicio" es especificado antes que la probabilidad de inicio de la corrosión del acero exceda un nivel de servicio superior a 10%, lo que está de acuerdo con las normas actuales de confiabilidad de las estructuras. Basado en los cálculos, una combinación de la calidad del concreto y del recubrimiento de concreto puede ser seleccionada, que reunirá lo especificado "período de servicio." En el caso de plataformas offshore de concreto en el Mar del Norte, los requisitos de desempeño basados en difusividad de cloruro (medido en el ASTM C 1202) y resistividad del concreto, bien como el espesor del recubrimiento fueron especificados. Gjörv sugiere que la resistividad pueda ser usada para evaluar la difusividad del cloruro del concreto estructural, como para el control de calidad *in loco*.

2.4.4 España

En España, Andrade et al (1993) propusieron el uso de la resistividad eléctrica para caracterizar los procesos de transporte de masa universalmente en el concreto, es decir para la difusión de cloruro y permeabilidad de gas. La resistividad ofrece una medida rápida, fácil y barata de la penetración en el concreto, también adecuada para uso local, para control de calidad de nuevas estructuras. Una limitación del ensayo es que no puede considerar la influencia de la capacidad de enlace de los mecanismos de transporte. La resistividad tiene la ventaja de permitir la

evaluación de las estructuras existentes por medio de mapeamiento sistemático, descrito en la Recomendación RILEM TC 154-EMC (Andrade et al, 2004). Además de las medidas de resistividad, Andrade propone el uso de medidas de potencial de media célula y determinación del local del rango de corrosión usando Resistencia de Polarización (Andrade et al, (2004).

Modelos de vida útil (SLM) para el período de iniciación y propagación de la corrosión, con base en la resistividad eléctrica, fueron desarrollados y son relatados en Andrade (2004) y Andrade y d'Andrea (2010). Los parámetros de entrada al modelo son el tipo de cemento, clase de exposición a partir de la cual el valor de CO₂ es obtenido, vida útil, por ejemplo 100 años, recubrimiento y factor de envejecimiento. A partir de esos parámetros de entrada, la resistividad es obtenida como un indicador de corrosión (o indicador de durabilidad) que puede ser usado para evaluar el desempeño de una estructura.

2.4.5 Suiza

La norma Suiza SN 505 262/1: 2013 incorpora varios DIs, prescribiendo valores límites para el cumplimiento por los productores de concreto. Entre ellos están el ensayo de migración de cloruro ASTM C1202 y un ensayo de carbonatación acelerada. Una DI es prescrita para conformidad, para el seguimiento del producto final, usando el ensayo in situ de permeabilidad al aire desarrollado por Torrent (1992), con valores límite para cloruros y corrosión inducida por carbonatación.

Las reglas para la aplicación del ensayo de permeabilidad al aire de Torrent para control de calidad y durabilidad son ofrecidas en la norma suiza SN 505 262/1 (2013), resumida por Torrent et al (2012). Limitando los valores de coeficiente de permeabilidad, kT, basándose en las condiciones de exposición de la EN 206-1. El concreto *in situ* debe ser ensayado entre 28 y 91 días posteriormente su lanzamiento. Para cementos de reacción lenta, con cenizas volantes, debe ser considerada una edad mínima de ensayo de 63 días. Precauciones deben ser tomadas para evitar ensayos de concreto en temperaturas muy bajas o con altos niveles de saturación. El contenido de humedad es verificado usando un instrumento basado en impedancia eléctrica, con un límite superior de humedad de 5,5% (en peso). Esos detalles sobre evaluación de conformidad y ensayos de aceptación son datos en la norma Suiza o en (Jacobs et al., 2009), (Torrent e Jacobs, 2014).

2.4.6 África del Sur

La industria de concreto de África del Sur ha experimentado especificaciones de desempeño y proyecto de durabilidad desde hace dos años (Alexander et al, 2001). Un enfoque de "índice de durabilidad" fue desarrollada para mejorar la calidad de la construcción de concreto armado, es decir visa controlar la corrosión del acero. Se basa en la medición de las propiedades de transporte de la capa de recubrimiento, tanto para el laboratorio como para el concreto *in situ*. Las principales etapas en la formulación de ese enfoque fueron el desarrollo de métodos de ensayo adecuados para medir los índices de durabilidad, caracterizando una serie de concretos usando esos ensayos, estudiando el desempeño *in situ* y aplicando los resultados y la construcción práctica. El enfoque progreso hasta el punto en que el proyecto de durabilidad racional y las especificaciones de durabilidad basadas en desempeño existen y están siendo aplicados en la construcción real.

El enfoque del Índice de Durabilidad (DI) se basa en los siguientes principios:

- La durabilidad del concreto armado depende de la calidad del concreto del recubrimiento o capa superficial, es decir, su capacidad de proteger al acero.
- La durabilidad solo puede ser garantizada si un parámetro de durabilidad puede ser medido.
- La calidad de la capa de recubrimiento debe ser caracterizada usando parámetros que influyan en los procesos de deterioro y que están ligados a mecanismos de transporte relevantes.

- Los ensayos son necesarios para cubrir o intervalo de problemas de durabilidad, cada ensayo debe ser vinculado a un mecanismo de transporte relevante para dicho proceso.
- La utilidad de los ensayos es evaluada por referencia al desempeño de durabilidad actual de las estructuras construidas usando los índices para fines de control de calidad.

Tres ensayos de DI fueron desarrollados: índice de permeabilidad al oxígeno, índice de conductividad del cloruro y ensayos del índice de sortividad (absorción capilar) del agua (ver Tabla 2). DIs son parámetros cuantificables de “ingeniería” v que caracterizan el concreto de la estructura construida (o de laboratorio) y son sensibles a factores materiales, de procesamiento y ambientales, como tipo de cemento, relación agua/aglomerante, tipo y grado de curado, etc. La indexación de materiales ofrece medidas de ingeniería reproducibles de la microestructura y de las principales propiedades del concreto en una edad relativamente precoz (por ejemplo, 28 días). El ensayo de los valores DI es hecho en muestras que son removidas de cualquier laboratorio o de paneles de ensayo o estructuras reales. Ensayos de demostración de locales rigurosos mostraron que la extracción de testigos no es adecuada, siendo los paneles de ensayo más representativos de la construcción *in situ* (Ronny y Everitt, 2010). Normalmente, paneles de ensayo (400 mm de ancho, 600 mm de altura y 150 mm de espesor) son construidos adyacentes a la misma estructura de concreto, tipo de obturador, métodos de compactación y curados usados en el panel y al mismo tiempo en la estructura real. Los testigos son extraídos en 28 - 35 días y llevados para un laboratorio de ensayos de durabilidad. Para elementos prefabricados, las muestras para ensayo son obtenidas directamente de los elementos actuales.

El enfoque también permitió correlaciones entre los índices de durabilidad, los resultados de los ensayos directos de durabilidad y el desempeño estructural, y los índices pueden, por lo tanto, ser usados en la siguiente manera:

- Para controlar una determinada propiedad o calidad de la zona de recubrimiento, reflejada por una especificación de construcción en la cual los límites para valores de índice son especificados
- Para evaluar la calidad de construcción para conformidad con un conjunto de criterios de desempeño
- Para pago justo para la obtención de calidad concreta.
- Para prever el desempeño del concreto en el ambiente de proyecto, siendo vinculado a los Modelos de Vida útil. Dos SLMs que incorporan los índices de durabilidad relevantes fueron desarrollados para condiciones de servicio - un modelo de entrada de carbonatación es un modelo de ingreso de cloruro (Mackechnie y Alexander, 2002).

Es importante resaltar que el trabajo de África del Sur representa un enfoque "integrado" en el cual los índices de durabilidad medidos que ofrecen la calidad real del material en pre-ensayos, situaciones de laboratorio o en la estructura *as-built* están vinculados a las especificaciones de construcción para fines de control de calidad y modelos de previsión de vida útil usados en el proyecto. Tal enfoque permite integración completa y consistencia entre proyecto, especificación y calidad de construcción. (La implementación del enfoque surafricano es posteriormente explorada).

2.5 Resumen: enfoques basados en desempeño

La Tabla 2 resume modelos de previsión de vida útil de proyecto en países seleccionados para especificaciones basadas en desempeño.

La Tabla 2 indica que hubo de hecho progresos en dirección a métodos basados en desempeño en varias partes del mundo. Los problemas aún existen, y es dudoso que un enfoque universal pueda surgir fácilmente en poco tiempo. No obstante, es probablemente más apropiado que sean encontradas soluciones locales o regionales que puedan ayudar a llevar adelante la construcción de concreto en esas localidades.

Es muy importante resaltar que: las especificaciones de desempeño deben exigir que la evaluación de la calidad del concreto, en relación con la durabilidad, sea considerada verdaderamente “basado en desempeño”. La precalificación y el ensayo de mezclas de laboratorio no son suficientes, lo que significa que muchos de los enfoques dichos de “desempeño” son apenas parciales en esta fase. (Mas informaciones sobre la implementación de enfoques basadas en desempeño en partes del mundo pueden ser encontradas en el Capítulo 6 de Alexander et al, 2017).

Tabla 2. Resumen de los enfoques basados en desempeño de durabilidad en varios países (con base en indicadores o índices de durabilidad) (Detalles en Alexander (2016b))

País	Parámetro de Durabilidad (Indicador o Índice)	Modelo de vida útil de proyecto	Método de ensayo de durabilidad
Canadá	Penetración de ion cloruro	Nenhum identificado	ASTM C 1202 Ensayo de penetración de cloruro
Francia	Coefficiente de difusión de cloruro - permeabilidad al gas aparente - permeabilidad a agua líquida - Contenido inicial de Ca (OH) ₂ - Porosidad accesible por agua	LCPC Modelos empíricos	Difusión de cloruros - ensayos de migración y difusión Permeabilidad al aire y agua
Holanda	Penetración de ion cloruro	DuraCrete Proyecto de durabilidad basado en probabilidad	NT Build 492, ensayo rápido de migración de cloruro Dos Métodos de Eletrodo (TEM)
Noruega	Difusividad de Cloruro	DuraCon Basado en probabilidad Proyecto de durabilidad	NT Build 492, ensayo rápido de migración de cloruros Dos Método de Eletrodo (TEM)
España	Resistividad eléctrica	- Basado en resistividad modelo - LIFEPRD	Dos puntos o Wenner cuatro pines ensayo de resistividad
Suiza	Migración de Cloruro Carbonatación Acelerada Permeabilidad al aire en el local	ninguno identificado	Límites Máximos: SN 505 262/1-B (NT Build 492) Límites Máximos: SN 505 262/1-I Límites Máximos: SN 505 262/1-E (Torrent kT)
África del Sur	Permeabilidad al oxígeno Sorción de agua Conductividad del cloruro Laboratorio ou site	Cloruro y Modelos de iniciación de corrosión inducida por carbonatación	Índice de permeabilidad de oxígeno OPI Índice de conductividad de cloruro CCI Índice de absorción capilar del agua WSI

3. CAMINOS A SEGUIR Y PASOS PRÁCTICOS

“Modelando Vida Útil y Proyecto da Vida Útil” están íntimamente relacionados: i) ambos involucran la evaluación del desempeño en durabilidad de una estructura durante su vida útil proyectada, ii) proyecto racional para durabilidad precisa de modelos de deterioro predictivos que

ofrecen a química y cinética del problema y iii) modelaje predictivo ofrece la base para el proyecto.

No obstante, en los últimos análisis los ingenieros de proyecto trabajan con normas técnicas. Así los modelos predictivos necesitan ser vinculados a normas, sea implícitamente siendo incorporados a ellos o explícitamente siendo aceptados como modelos adecuados para el proyecto que se vinculan a los requisitos de la norma de proyecto. Prácticamente, el “progreso real” solo ocurrirá con la formulación y ratificación de normas y patrones de proyecto. Esta sección revisa los aspectos de la normalización actual para el proyecto de durabilidad y ofrece un ejemplo de la práctica surafricana de la implementación de una especificación de desempeño de durabilidad.

3.1 Acciones para la normalización del proyecto de vida útil

El *fib* Model Code for Service Life Design (2006) clasifica enfoques para el proyecto de vida útil como: probabilístico completo, método de los factores parciales, método prescriptivo o considerada para satisfacer el método para evitar el deterioro. Cualquiera de esos enfoques puede ser usado, aunque un enfoque probabilístico completo sea deseable para grandes proyectos de infraestructura pública o estructuras de prestigio.

Actualmente los enfoques para proyecto de durabilidad racional son limitadas y de implementación variable. Por ejemplo, los enfoques europeos del DURACRETE (1998) y Life-365 (2005), aunque son útiles, son de localización específica y no representan totalmente un enfoque integrado, que requiera parámetros de durabilidad mensurables del local, que son usados en una especificación de desempeño y acoplado a modelos de vida útil. El proyecto de durabilidad también necesita una especificación para la implementación durante la construcción, para garantizar que las premisas de proyecto para calidad y composición del concreto sean alcanzadas. Una vez que los enfoques mencionados no son normalizados, las autoridades de proyecto y especificación encuentran una justificativa limitada para usarlas especialmente se no tuvieran los conocimientos necesarios.

3.1.1 Enfoque de la vida útil de proyecto y estados límites

Walraven sugiere que la aplicación práctica de un enfoque basado en el desempeño para la evaluación de vida útil y normalización requiere los siguiente elementos (Walraven, 2008): (i) limitar criterios estadales, (ii) una vida útil definida, (iii) modelos de deterioro, (iv) ensayos de conformidad, (v) estrategias de mantenimiento y reparación, y (vi) sistemas de control de calidad. Criterios de estado límite para durabilidad del concreto deben ser cuantificados, con significado físico claro, como porcentajes de fisuras, y similares. Los modelos de deterioro son generalmente matemáticos y deben incluir parámetros vinculados a los criterios de desempeño.

Como se ha indicado, la importancia de las normas hace esencial que cualquier enfoque útil sea normalizado. Las normas estructurales, que incluyen previsiones de durabilidad, acostumbra a ser lentas para ser actualizadas, de modo que nuevos conocimientos de investigación y práctica tardan en entrar en las normas. Como un ejemplo de proyecto de durabilidad basado en desempeño, la ISO 13823 (2008) describe una metodología de estado límite, resumida en la Fig. 7, que está relacionada a diferentes enfoques de proyecto de vida útil.

La Fig. 7 también es reflejada en el *fib* Model Code (2010), con varios enfoques para el proyecto de la vida útil. En principio los enfoques de proyecto en el Model Code evitan el deterioro causado por la acción ambiental, similar a los enfoques actuales de proyecto; estos son, por lo tanto, "inteligible" para ingenieros de proyecto estructural. Basado en modelos cuantificables para las acciones ambientales y la resistencia (es decir la resistencia contra la acción ambiental), las opciones de proyecto con o *fib* son bajo un enfoque probabilístico completo; enfoque semi-probabilístico (factores parciales); reglas prescriptivas consideradas satisfactorias; o evitar el ataque que lleva al deterioro.

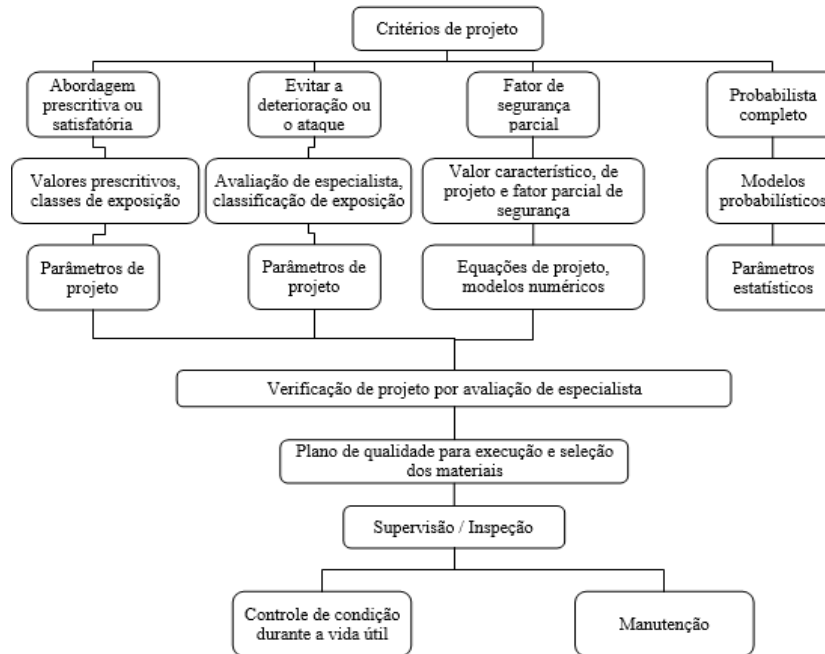


Figura 7. Resumen de los enfoques de proyecto de vida útil (ISO 13823, 2008)

El enfoque probabilístico completo debe ser usado apenas para estructuras excepcionales y es basado en modelos probabilísticos que son suficientemente validados para ofrecer resultados realistas y representativos de mecanismos de deterioro y de resistencia del material. La base es formada por métodos de ensayo apropiados y modelos de evaluación estadística, los cuales aún no son significativos. Las dos primeras opciones de incluir la evaluación cuantitativa del desempeño de una estructura utilizando la teoría de estado límite, documentada en la norma ISO 2394 (2015), con tres estados límite: estado límite último (ULS), estado límite de servicio (SLS), y estado límite de durabilidad (DSL). El ULS aborda la seguridad y la estabilidad de la estructura (ver, por ejemplo, EN 1990-1: 2002). El SLS considera deformaciones y vibraciones en la estructura. El DLS marca el inicio de la falla de durabilidad, por ejemplo, la iniciación de la corrosión en una estructura RC (ISO 13823: 2008). Cada uno de los tres estados es caracterizado por un límite de desigualdad. Ecuación 1:

$$R - S > 0 \quad (1)$$

La tarea del proyectista es realizar la verificación del desempeño de una estructura para garantizar que las variables de proyecto seleccionadas sean tales que el estado límite especificado no es alcanzado dentro de la vida útil proyectada. La verificación del desempeño depende del enfoque probabilístico utilizado, por ejemplo, el factor probabilístico total o parcial de seguridad (semi-probabilístico).

Discutiendo aún el enfoque del factor de seguridad parcial, la naturaleza probabilística del problema (dispersión de la resistencia del material y datos de cargas) es considerada a través de factores de seguridad parciales. Se basa en los mismos modelos del enfoque probabilístico completa y pretende presentar una herramienta de proyecto práctica y estadísticamente confiable. El enfoque considerado para satisfacer (prescriptiva) y comparable a las especificaciones de durabilidad dadas en la mayoría de los códigos y normas actuales, es decir especificaciones prescriptivas basadas en una selección de determinados valores de proyecto (dimensionamiento, selección de materiales y productos, procedimientos de ejecución) dependiendo de las clases ambientales. La diferencia entre el enfoque considerado para satisfacer el *fib* Model Code y las reglas tradicionales de proyecto de vida útil es que el último comúnmente no es basado en modelos físicos y químicos para concreto, pero en gran parte en la experiencia práctica anterior.

Construindo um projeto de vida útil de estruturas de concreto - histórico, desenvolvimentos e implementação

No obstante, un estimado de la vida útil específica no es necesaria en el enfoque de la “Considerada-para-Satisfacer”, haciéndola un enfoque prescriptivo. Por ejemplo, la norma europea EN 206-1:2013 adopta un enfoque Considerada-para-Satisfacer y prescribe consumo mínimo de cemento, máxima relación a/c, y clase mínima de resistencia a la compresión para componentes de concreto en varias clases de riesgo ambiental.

El cuarto nivel de proyecto de la vida útil (es decir, evitar el deterioro) exige el uso de materiales resistentes al deterioro, tal como el acero inoxidable o revestimientos de protección superficial del concreto, como epóxi, membranas, poliuretano, etc. El mantenimiento puede aún ser necesario con la renovación de estos revestimientos periódicamente.

Además de eso, muchas estructuras u sus partes no están expuestas a graves mecanismos de deterioro ambiental u operacionales, es el caso en que una simple atención a las buenas prácticas constructivas ya hará la diferencia y se alcanzará la vida útil deseada. Esto es ejemplificado en la categoría de exposición XO de la EN 206-1:2013. Descrita como "Concreto dentro de edificios con bajísima humedad de aire", lo que representa una gran proporción de construcción de concreto en ambientes suaves o benignos, considerados de agresividad nula.

3.2 Ejemplo de implementación: El enfoque del DI Surafricano en la práctica

El enfoque del modelaje del proyecto de vida útil de África del Sur fue revisado anteriormente, y esta sección esboza brevemente un ejemplo de implementación (Alexander, 2016b). El enfoque progresó hasta el punto en que tanto el proyecto de durabilidad racional como las especificaciones de durabilidad basadas en el desempeño están en vigor y siendo aplicadas en la construcción actual (Nganga et al, 2013, Alexander et al, 2001, Gouws et al, 2001, Raath, 2004). El enfoque permite que la variabilidad del material y de la producción que sea cuantificada y que sea buscado un equilibrio de forma que las metas sean alcanzadas tanto por el productor de concreto como por los constructores de concreto, basados en principios estadísticos (Alexander et al, 2008).

3.2.1 Implementación basada en el desempeño del Índice de Durabilidad DI en los principales proyectos de puentes

Una implementación significativa y a gran escala usando el enfoque basado en el desempeño del DI fue realizado en un gran proyecto de infraestructura - el Proyecto de mejoras de la vía expresa de Gauteng (GFIP) – que mejoró el sistema de autopistas en la provincia de Gauteng entre 2007 y 2012 para aliviar el congestionamiento. El trabajo involucró el ensanchamiento de la autopista a través de la incorporación de los canales de tráfico y la construcción de intercambios con puentes asociadas a un costo cercano a US \$ 2 billones. Debido al ambiente interno, el enfoque de DI exigió que apenas los ensayos de OPI y de sortividad (absorción capilar) fuesen realizados en concreto *in situ*. Los valores límites adoptados fueron mínimo de 9.70 para OPI y un máximo de 10 mm / sorhr. Las profundidades de recubrimiento de concreto de la armadura también fueron monitoreadas (ver Tabla 3).

Los valores límites aplicados están resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores límites utilizados en el GFIP (SANRAL, 2010)

	Índice de Permeabilidad de Oxígeno (OPI)		Recubrimiento de concreto	
	OPI (escala logarítmica)	Porcentajes pagamento	Recubrimiento general (mm)	Porcentajes pagamento
Aceptación total	> 9.70	100%	≥ 85% <(100%+15mm)	100%
Aceptación	> 8.75 ≤ 9.70	80%	< 85% ≥ 75%	85%

condicional^a				
Aceptación condicional^b	-	-	< 75%	70%
Rechazo	< 8.75	No aplicable	< 65%	No aplicable

Se verificó que, aunque los valores-límite hayan sido obtenidos en promedio os conjuntos individuales de resultados (de diferentes subproyectos) mostraron alta variabilidad, ilustrada en la Tabla 4. La dispersión de la variabilidad obtenida en subproyectos seleccionados es clara, y la diferencias entre la construcción de “calidad” (aquí representada por la variabilidad) son removidas completamente. Solamente el subproyecto 9 (un patio de construcción prefabricado) alcanzó una variabilidad baja aceptable, con todos los resultados atendiendo las especificaciones del proyecto. Los resultados *in-situ* de los otros subproyectos son una buena ilustración de la variabilidad que puede ser introducida en las estructuras *as-built* por los procesos de construcción *in loco*, una vez que son básicamente los concretos de la misma fuente.

4. CONCLUSION

Es claro que, para el modelaje del proyecto de vida útil de estructuras de concreto, un progreso considerable fue alcanzado en décadas, aun cuando haya un gran progreso por alcanzar. La necesidad de enfoques basados en el desempeño, sin las cuales el proyecto de vida útil no puede ser implementado, es ahora razonablemente bien reconocida, pero no siempre puede ser practicada.

Tabla 4. Resumen numérico de los resultados de ensayo OPI – GFIP (Nganga et al, 2013)

Subproyecto	n	OPI (escala log)				Coeficiente de variación (%)	Porcentajes de fallas* (%)
		Promedio	Máx.	Mín.	s		
1	172	9.75	10.41	9.07	0.28	2.84	40.1
2	94	9.91	10.42	9.37	0.22	2.24	13.8
4	116	9.87	10.40	9.39	0.23	2.33	18.1
6	91	10.06	11.10	8.83	0.46	4.60	26.4
9	132	10.25	10.70	9.85	0.18	1.75	0

*Valores que no alcanzaron el valor límite de 9,70

Enfoques surgieron en diferentes partes del mundo en gran parte como respuesta a las necesidades observadas de mejor durabilidad de las estructuras de concreto. No obstante, aún falta un enfoque verdaderamente universal, aunque los documentos del *fib* Model Code y otros hayan sido delineados a la filosofía básica y los enfoques necesarios. Grandes progresos pueden ser esperados en esta importante área de proyecto y construcción de concreto en los próximos años.

5. REFERENCIAS

- Alexander, M. G. & Ballim, Y. (1993), “*Experiences with durability testing of concrete: a suggested framework incorporating index parameters and results from accelerated durability tests*”. Proc. 3rd Canadian Symp. on Cement and Concrete, Ottawa, August 1993, Nat. Res. Council, Ottawa, Canada, 1993: 248-263.
- Alexander, M. G., Mackechnie, J. R., Ballim, Y. (2001), “*Use of durability indexes to achieve durable cover concrete in reinforced concrete structures*, Chapter, Materials Science of Concrete, V. VI, Ed. J. P. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, pp 483 – 511.

- Alexander, M. G., Ballim, Y., Stanish, K. (2008), “A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures”, *Materials & Structures*, V. 41, No. 5, pp. 921-936.
- Alexander, M. G., Santhanam, M. (2013), “Achieving durability in reinforced concrete structures: durability indices, durability design and performance-based specifications”. Keynote paper at International Conferences on Advances in Building Sciences & Rehabilitation and Restoration of Structures, IIT Madras, Chennai, India, 21pp.
- Alexander, M. G. & Thomas, M. (2015), “Service Life Prediction and Performance Testing – Current Developments and Practical Applications”. *Cement & Concrete Research*, Vol 78, pp. 155-164.
- Alexander, M. G. Ed. (2016a), “Marine concrete structures. Design, durability and performance”. Ed. M.G. Alexander, Cambridge: Woodhead Publishers (Imprint of Elsevier). 400 pp.
- Alexander, M. G. (2016b), “Performance-based concrete durability design and specification in South Africa – background, implementation, and quo nunc?” *Proceedings fib Symposium*, Cape Town, Lausanne, fib, pp. 52-62.
- Alexander, M. G., Bentur, A., Mindess, S. (2017), “Durability of Concrete: Design and Construction”. CRC Press, Taylor & Francis Group, U.K.
- Andrade, C., Alonso, C., Goni, S. (1993), “Possibilities for electrical resistivity to universally characterize mass transport processes in concrete”. In *Concrete 2000 Economic and durable construction through excellence Volume Two: Infrastructure, research, new applications*. Dhir, R. K. and Jones, M. R. ed. Scotland, UK: E & FN SPON, pp. 1639–1652.
- Andrade, C. (2004), “Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity”. In *International Symposium: Advances in Concrete through Science and Engineering*. Evanston, Northwestern University, USA, (2004) p. 8.
- Andrade C, Alonso C, Gulikers J, Polder R, Cigna R, Vennesland Ø, Salta M, Raharinaivo A, Elsener B. (2004), “RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Recommendations Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method”, *Materials & Structures* V. 37, No. 273, pp. 623-643.
- Andrade, C., Izquierdo, D. (2005), “Benchmarking through an algorithm of repair methods of reinforcement corrosion: the Repair Index Method”, *Cement & Concrete Composites*, V. 27, No. 6, pp.727-733.
- Andrade, C., d’ Andrea, R. (2010), “Electrical resistivity as microstructural parameter for modelling of service life of reinforced concrete structures”, In *2nd International symposium on service life design for infrastructure*. pp. 379–388.
- Australian Standard (AS) (2007), *AS 1379: “Specification and Supply of Concrete”*. Sydney: Standards Australia.
- ASTM International. (2010). *ASTM C457/C457M-10a Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/C0457_C0457M-10A
- ASTM International. (2010). *ASTM C1202-10 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1202-10>
- ASTM International. (2004). *ASTM C1556-04 Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1556-04>

- ASTM International. (2004). *ASTM C1585-04e1 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1585-04E01>
- Bickley, J. A., Hooton, D. and Hover, K. C. (2006), “Performance specifications for durable concrete”. *Concrete International*, 28(9): 51-57.
- Canadian Standards Association (2004), *CAN/CSA-A23.1-04/A23.2-04: Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Methods of Test and Standard Practices for Concrete*, Toronto, 516 pp.
- Day, K. W. (2005), “Prescriptive on prescriptions”, *Concrete International*, V. 7, pp.27–30.
- DuraCrete (1998), “Probabilistic performance-based durability design: modelling of degradation”, Document, D. P. No. BE95-1347/R4-5, The Netherlands.
- EN 1990-1 (2002), Eurocode: “Basis of structural design”, CEN, Brussels, 2002.
- EN 206-1 (2013), “Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity”, CEN, Brussels, 2013.
- fib Model Code for Service Life Design (2006) *fib Bulletin 34, fib*, EPFL Lausanne, 116 pp.
- fib Model Code (2010, 2013), International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland.
- Gjørsv, O. E. (2014), “Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments”, 2nd edition, Taylor & Francis, CRC Press, London.
- Gouws, S. M., Alexander, M. G., Maritz, G. (2001), “Use of durability index tests for the assessment and control of concrete quality on site”, *Concrete Beton*, 98 pp. 5-16.
- Guillon, E., Le Bescop, P., Lothenbach, B., Samson, E. and Snyder, K. (2013), “Modelling degradation of cementitious materials in aggressive aqueous environments”, Part II in Star 211-PAE, Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments, pp. 1- 39. Springer.
- ISO 13823-1 (2008), “General Principles on the design of structures for durability”, International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO 2394 (2015), “General Principles on Reliability for Structures”, International Organization for Standardization, Geneva, 111pp.
- Jacobs, F., Leemann, A., Denarié, E., Teruzzi, T. (2009), SIA 262/1. “Recommendation for the quality control of concrete with air permeability measurements”, VSS report, Zurich. 22 pp.
- LIFE-365 (2005). ACI-Committee-365, “Service life prediction model, Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides”. American Concrete Institute.
- Linger, L., Cussigh, F. (2018), “PERFDUB: A New French Research Project on Performance-Based Approach for Justifying Concrete Structures Durability”. In High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet.1. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2>
- Lobo, C., Lemay, L. and Obla. K. (2005), “Performance-based specifications for concrete”. *The Indian Concrete Journal*, 79(12): 13-17.
- Mackechnie, J. R, Alexander, M. (2002), “Durability predictions using early-age durability index testing”. Proceedings, 9th Durability and Building Materials Conference, Australian Corrosion Association, Brisbane, (2002) 11pp.
- Muigai, R. N., Alexander, M. G., Moyo, P. (2009), “Use of chloride conductivity index in probabilistic modelling for durability design of RC members”. *Restoration of Building Monuments Journal*, V. 15, No. 4, pp. 267-276.
- National Ready-mix Concrete Association, (NRMCA), n.d. www.nrmca.org/P2P
- Neville, A. M. (1987), “Why we have concrete durability problems”, ACI SP-100, Katherine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, American Concrete Institute, Detroit, USA, pp. 21-48.

- Nganga, G., Alexander, M. G., Beushausen, H. (2013), *“Practical implementation of the durability index performance-based design approach”*. Construction & Building Materials, Published online: 6-MAY-2013. Construction and Building Materials. V. 45, pp. 251-261.
- Nilsson, L. O., Poulsen, E., Sandberg, P., Sørensen, H.E., Klinghoffer, O. (1996), *“Chloride penetration into concrete”*, State of the Art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models, Copenhagen: Danish Road Directorate, pp.23-25.
- NTBUILD 492, (1999), *“Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments”*. Esbo, Finland: Nordtest.
- Raath, B. (2004), *“Practical Issues of Concrete Specification”*. Concrete Society of Southern Africa, National Seminar: Specifying Concrete for Durability - State of the Art of South African Practice, Presented at Johannesburg Durban, Port Elizabeth and Cape Town, South Africa.
- RILEM TC 189-NEC (2005), *“Non-destructive evaluation of the concrete cover: Comparative test - Part I: Comparative test of ‘penetrability’ methods”*. Materials and Structures (284), 2005.
- Ronny, R., Everitt, P. (2010), *“Durability specification and testing results from four bridge structures in Kwa Zulu-Natal”*, In Concrete for a sustainable environment, Emperor's Palace, Kempton Park, Gauteng, South Africa.
- The South African National Roads Agency Limited (SANRAL) (2010), *“Project document: Project specifications”*.
- Simons, B. (2004), *“Concrete performance specifications: New Mexico Experience”*. Concrete International, 26(4): 68-71.
- Streicher, P., Alexander, M. G. (1995), *“A chloride conduction test for concrete.”* Cement and Concrete Research, V. 25, No. 6, pp 1284-1294.
- Swiss Standard SN 505 262/1 (2013), *“Concrete Construction – Complementary Specifications”*, Schweizer Norm, 52 p. (in German and French)
- Tang, L. (2008), *“Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete”*, Cement and Concrete Research, 38(8–9), 1092–1097.
- Taylor, P. (2004), *“Performance-Based Specifications for Concrete”*, Concrete International, 8: 91 – 93.
- Thomas, M. D. A., Green, B., O’Neal, E., Perry, V., Hayman, S. Hossack, A. (2012), *“Marine Performance of UHPC at Treat Island”*, Proceedings of Hipermat, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials (Editors Michael Schmidt et al), Kassel, pp. 365-370.
- Torrent, R. J. (1992), *“A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site”*, Materials & Structures, V. 25, No. 6, pp.358-365.
- Torrent, R., Denarié, E., Jacobs, F., Leemann, A., Teruzzi, T. (2012), *“Specification and site control of the permeability of the concrete cover: The Swiss approach”*, Materials and Corrosion, V. 63, No. 12, pp.1127-1133.
- Torrent, R., Jacobs, F. (2014), *“Swiss Standards 2013: World's most Advanced Durability Performance Specifications”*, 3rd Russian Intern. Confer. on Concrete and Ferrocement, Moscow.
- Tuutti, K. (1992), *“Corrosion of steel in concrete”*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI Research Report, No. 4 p 82.
- Van der Lee, J., De Windt, L., Lagneau, V. (2008), *“Application of reactive transport models in cement-based porous media”*. Proceedings in the International RILEM Symposium on Concrete Modelling – CONMOD’08, Delft, The Netherlands.
- Walraven, J. (2008), *“Design for service life: how should it be implemented in future codes”*, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Proceedings ICCRRR Cape Town, (2008) pp. 3-10.