

Revisión de la evolución de modelos conceptuales de vida de servicio para el concreto reforzado.

P. Castro-Borges^{1*} 

*Autor de Contacto: pcastro@cinvestav.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.996>

Recibido: 08/09/2025 | Correcciones recibidas: 01/12/2025 | Aceptado: 17/12/2026 | Publicado: 01/01/2026

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es revisar, de acuerdo con la literatura disponible, varios de los modelos conceptuales de vida de servicio del concreto reforzado en términos de durabilidad, resaltando sus contribuciones y los aspectos en los que evolucionaron con respecto a sus antecesores. El recorrido se hace en forma cronológica hasta tiempos actuales iniciando con el trabajo pionero de Tuutti de 1982. Se aborda la transición de modelos fenomenológicos a temporales, de lo prescriptivo al desempeño, y de la visión general a la visión especializada. Una de las principales conclusiones es que cada modelo debe ajustar su validez a un rango de edad por la que la estructura transite, advirtiendo sobre la certidumbre de las predicciones en función de la etapa de vida de servicio a la que se acote. La revisión finaliza con reflexiones sobre el uso presente y futuro de estos modelos conceptuales.

Palabras clave: modelo conceptual; vida de servicio; durabilidad; desempeño; evolución.

Citar como: Castro-Borges, P. (2026), “Revisión de la evolución de modelos conceptuales de vida de servicio para el concreto reforzado.”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 111 – 126, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.996>

¹Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida, Carretera Antigua a Progreso, Km 6, 97310, Mérida, Yucatán, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo Pedro Castro Borges es el único autor, por lo tanto, el participó en todas las actividades para realizar su contenido.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2026.

Review of the evolution of conceptual service life models for reinforced concrete.

ABSTRACT

The objective of this work is to review, according to the available literature, several of the conceptual service life models of reinforced concrete in terms of durability, highlighting their contributions and the aspects in which they evolved with respect to their predecessors. The journey is made chronologically to the present time, beginning with the pioneering work of Tuutti in 1982. The transition from phenomenological to temporal models is addressed, as well as from the prescriptive to the performance point of view, and from the general vision to the specialized vision. One of the main conclusions is that each model must adjust its validity to an age range through which the structure transits, warning about the certainty of the predictions depending on the stage of service life to which it is confined. The review ends with reflections on the present and future use of these conceptual models.

Keywords: conceptual model; service life; durability; performance; evolution.

Revisão da evolução dos modelos conceituais de vida útil para concreto armado.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é revisar, de acordo com a literatura disponível, vários dos modelos conceituais de vida útil do concreto armado em termos de durabilidade, destacando suas contribuições e os aspectos em que evoluíram em relação aos seus predecessores. A jornada é feita cronologicamente até o presente, começando com o trabalho pioneiro de Tuutti em 1982. A transição dos modelos fenomenológicos para temporais é abordada, do prescritivo para a performance, e da visão geral para a visão especializada. Uma das principais conclusões é que cada modelo deve ajustar sua validade para uma faixa etária pela qual a estrutura transita, alertando sobre a certeza das previsões dependendo do estágio de vida útil ao qual está confinada. A revisão termina com reflexões sobre o uso presente e futuro desses modelos conceituais.

Palavras-chave: modelo conceitual; vida útil; durabilidade; performance; evolução.

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. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

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

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

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de vida de servicio son importantes porque permiten entender el comportamiento de una estructura y al mismo tiempo darle un seguimiento a lo largo del tiempo mediante mantenimientos preventivos y/o correctivos. Diversos autores, comités y organismos definen los tipos de modelo que se han manejado desde hace varias décadas, por mencionar algunos: ACI, 2000, 2017; Alconpat, 2020; CEB, 1982, 1983, 1987, 1997; CIB, 1991, 1996, 2004; DURACRETE, 1999, 2000; ISO, 2000, 2001, 2008, 2012; LIFE-365, 2005; NMX, 2018, 2020; fib, 2006, 2010, 2013; etc. Inicialmente, cuando el diseñador concibe la estructura, debe basarse o crear un modelo conceptual. El modelo conceptual se basa en dibujos y trazos que obedecen a lo que se quiere representar. Lo que se desea representar puede ser planteado en forma cualitativa o cuantitativa. De aquí que los modelos conceptuales permitan representar en forma ilustrada a los modelos empíricos y analíticos

Un modelo empírico es aquel que se basa en la experiencia y en resultados de prueba, generalmente de pruebas de campo y laboratorio, a los cuales se les aplican métodos de correlación, y de los cuales no se sabe si serán reproducibles bajo circunstancias diferentes a las que fueron obtenidos. Por su parte, un modelo analítico es aquel que representa situaciones en las que se han obtenido tantos resultados que han sido correlacionados bajo la acción de ciertas variables, que ya se convierten en leyes para los materiales de construcción o la durabilidad de estructuras. En el argot de la industria de la construcción, los modelos empíricos representan a los ingenieros y los modelos analíticos a los científicos (Reporte 14 de Rilem, 1996). Cuando se requiere construir un modelo de durabilidad, hay que considerar ambas opciones siempre, la empírica y la analítica.

El modelo conceptual, por su parte, no solo es una representación de lo que se esperarí en la vida real, en este caso la vida de servicio de la estructura, sino también de la forma en que puede abordarse algún parámetro en función del tiempo, por ejemplo, la degradación, el desempeño, la corrosión, etc. Esa forma de abordar puede corresponder a un modelo determinista, semi probabilista o probabilista (estocástico), es decir, modelos matemáticos.

La diferencia entre un modelo determinista y uno estocástico es la forma en que manejan la incertidumbre y la aleatoriedad.

Un modelo determinista asume que el resultado es completamente predecible, sin incertidumbre, usan ecuaciones para predecir el resultado y nos dan una única respuesta. Mientras que, un modelo probabilista asume desde el principio que hay aleatoriedad e incertidumbre. Por ello, en un modelo conceptual, se muestran como distribuciones de probabilidad.

En síntesis, un modelo conceptual muestra en forma esquemática lo que puede ocurrir con variables como la corrosión, grado de deterioro, desempeño, etc, a través de modelos matemáticos empíricos (determinísticos) y analíticos (estocásticos). Con ellos se pueden hacer predicciones cuya verificación, con el paso del tiempo, permite afinar el modelo conceptual.

Un modelo conceptual puede evolucionar en función de una gran variedad de factores, y es lo que ha ocurrido desde Tuutti, 1982, para el caso de la corrosión, grado de deterioro o desempeño de una estructura, según lo que se quiera representar.

En este trabajo se revisa la evolución de los modelos conceptuales para vida de servicio del concreto reforzado partiendo del modelo de Tuutti, 1982, discutiendo las aportaciones de cada uno con respecto a sus antecesores y exponiendo la tendencia que seguirán en los próximos años.

2. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS CONCEPTUALES.

El modelo de Tuutti, 1982, reproducido en la figura 1, fue un parteaguas que permitió ver el deterioro de la infraestructura en términos de durabilidad, y más específicamente de la corrosión. Tuutti lo presentó a través de su tesis doctoral en 1982. Por primera vez se consideraron dos períodos: el de iniciación, que incluye el tiempo que tardan los agentes agresivos en alcanzar el

refuerzo, y el de propagación, que considera el inicio de la corrosión, catalizada por condiciones ideales de temperatura y humedad asociadas a la presencia de agentes agresivos, como los cloruros o el CO_2 . Este fue un modelo conceptual centrado en el deterioro por corrosión.

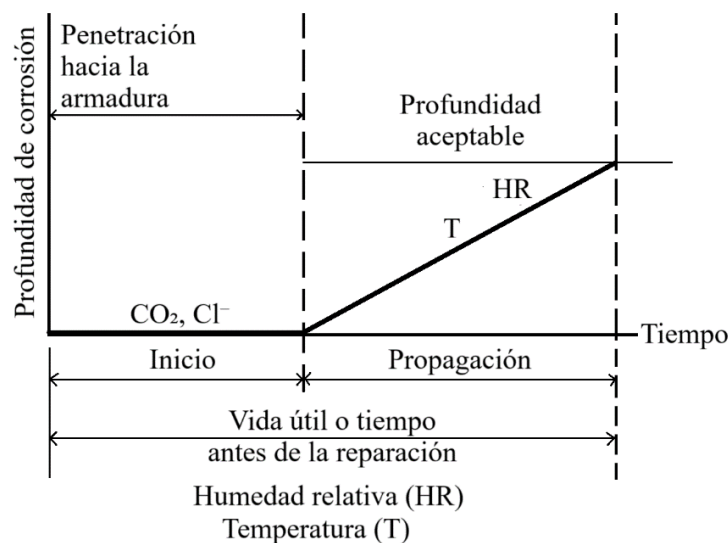


Figura 1. Modelo conceptual de Tuutti (reproducido y traducido de Tuutti, 1982).

Pasaron varios años y el modelo conceptual de Tuutti, 1982, sirvió de base para afinar nuevas inclusiones como la del estado límite o la del desempeño, ambas discutidas por el Comité 130 CSL de Rilem en 1994 (Sarja y Vesikari Eds., 1996). En la figura 2, reproducida del documento del Comité 130 CSL, se sustituye la profundidad de corrosión del modelo de Tuutti por el progreso de la corrosión en el eje Y. Este nuevo modelo considera que el período de propagación puede acelerarse en función del ángulo “ r ” en la etapa de propagación. De igual manera, adiciona un estado límite al cual se llega cuando se presentan una máxima pérdida de sección, o pérdida de sección o ancho de grieta admisibles. Más allá del estado límite, este modelo ilustra una línea punteada que da a entender un comportamiento desconocido. Este modelo fue concebido y especificado por este comité para casos de corrosión generalizada por carbonatación.

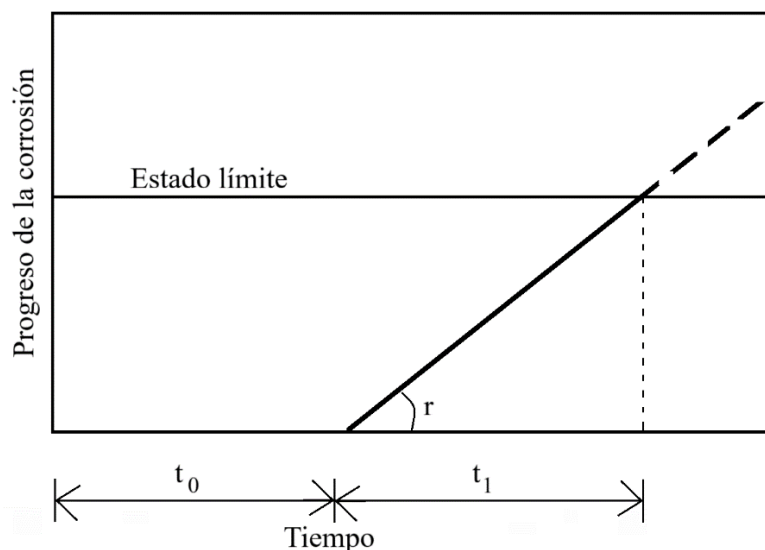


Figura 2. Modelo del Estado Límite del Comité 130 CSL de RILEM (reproducido y traducido de Sarja y Vesikari Eds, 1996).

El mismo comité 130 CSL, en aquella época, consideraba importante que los modelos conceptuales, o empíricos, pudiesen sostenerse a través de las investigaciones necesarias. Con ello sería posible incorporar parámetros ambientales y desarrollar otros tipos de modelo, en especial cuantitativos. El modelo de la figura 3 da cuenta de ello al mostrar que las coordenadas X e Y del modelo siguen una distribución gaussiana, es decir, que el modelo tiene también criterios probabilistas. Esta es una de las principales contribuciones de aquel reporte. Ahora bien, en aquellas épocas aún no había el auge de tantas variedades de cementos y concretos que bien podrían tener, y la tuvieron, una importancia trascendental en sus comportamientos a corto plazo. De aquí la importancia de que los modelos siguiesen evolucionando para conservar esto último.

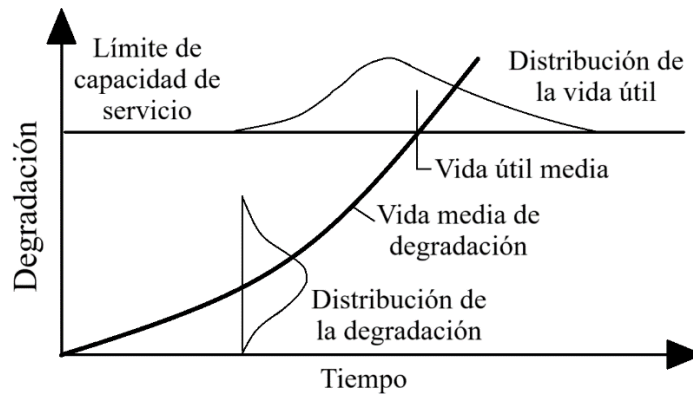


Figura 3. Modelo de degradación o desempeño del Comité 130 CSL de RILEM (reproducido y traducido de Sarja y Vesikari Eds., 1996).

Aunque el reporte 130 CSL fue publicado en 1996, los diversos coautores de este ya habían publicado previamente explicaciones sobre la validez de estos dos modelos y otros más en: Alonso y Andrade, 1993; Andrade et al, 1989, 1994; Bakker 1994; Fagerlund et al 1994; Kasami et al, 1986; Parrot 1992; Philajavaara 1984, 1994; Siemes et al 1985; Tuutti 1982; Vesikari 1981, 1988. Uno de los modelos conceptuales de aquella época fue el de Sommerville 1986a, 1986b, 1992, 1997, que se muestra en la figura 4. Este fue una evolución muy interesante de los modelos anteriores pues empezaba a definir lo que, en el modelo previo de la figura 2, se anticipaba con una línea punteada. En este modelo el eje Y se denomina ahora como “desempeño estructural” que inicia en forma óptima hasta el punto A que se denomina “desempeño presente” y que con el tiempo sigue decreciendo hasta el punto B que se denomina “desempeño mínimo aceptable”. La diferencia entre A y B es llamada ahora la “vida residual”. Este tipo de modelo ya no muestra en forma específica la etapa de iniciación y la de propagación, sino que intenta traducir los modelos previos al lenguaje de la ingeniería estructural. Esto, para lograr, quizá y en especial, una mejor comprensión en el sector de la ingeniería civil, y particularmente el de los ingenieros estructurales. El modelo, no solo llamó la atención, sino que rápidamente empezó a ser complementado. Uno de estos modelos que complementan la parte estructural es el de Andrade en 1994, que agrega el punto C, siendo la diferencia C-B el “factor de seguridad”, como se puede apreciar en la figura 5.

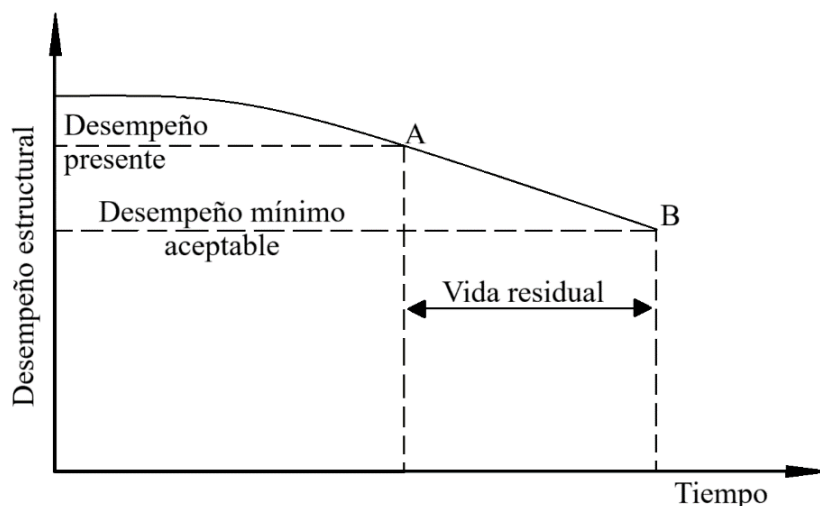


Figura 4. Modelo de Somerville, 1986a, 1986b, 1992, 1997 (reproducido y traducido de Somerville, 1997).

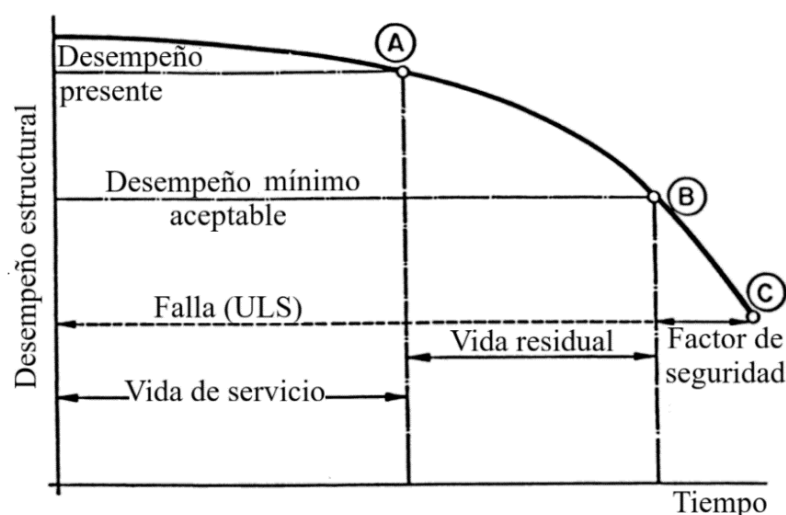


Figura 5. Modelo de Andrade, 1994 (reproducido y traducido de Andrade, 1994).

La interpretación de que el concreto reforzado tiene varias “vidas” fue cobrando fuerza y es Paulo Helene en 1993, 2003 cuando publica su modelo conceptual que relaciona las “vidas” por las que pasa el concreto con sus manifestaciones de daño, figura 6. Es decir, las evidencias de daño aparecen en diferentes “vidas”, pero se atribuyen a diversas causas. El modelo de Helene considera como mínimo la vida de servicio, la vida útil, la vida de servicio total, la vida de servicio residual, etc. Hasta aquellos momentos, se vislumbraba la necesidad de colocar en contexto, en los modelos empíricos, la existencia de varios tipos de vida y su relación con las manifestaciones fenomenológicas, o evidencias físicas. Paulo Helene (1993, 1997, 2003) es también uno de los primeros en considerar en el eje Y el desempeño.

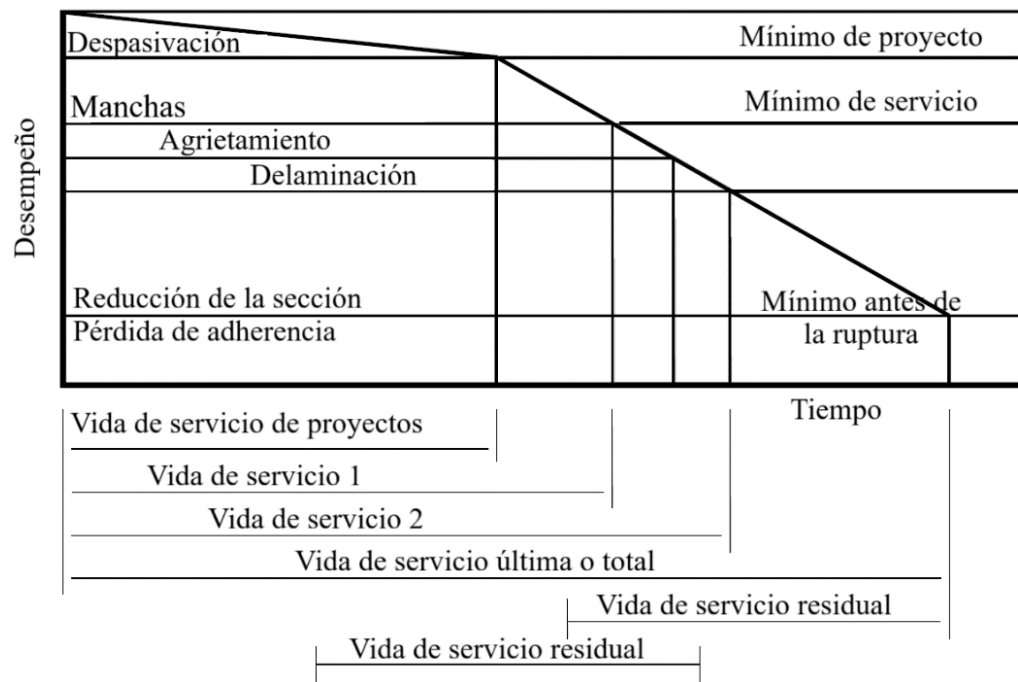


Figura 6. Modelo de Paulo Helene, 1993, 1997, 2003 (Reproducido y traducido de Helene, 1993).

Aunque seguramente habrá más contribuciones previas, es hasta 2002 cuando Siemes y de Vries, 2002, publican lo que podría decirse que fue uno de los primeros modelos fenomenológicos. En términos prácticos, aquel que se refiere a las evidencias. Siemes y de Vries 2002, muestran de nuevo los períodos de iniciación y propagación y refinan el eje Y llamándole “cantidad de daño”. Este modelo simplifica, en parte, lo que Paulo Helene había mostrado pocos años antes 1993, 1997. La contribución principal de Siemes y de Vries, 2002, es en el período de propagación donde muestran lo que bien podrían llamarse “pendientes de comportamiento” y denotan la cantidad de daño a tener en cuenta desde que inicia la corrosión para dar paso después al agrietamiento, pérdida de adherencia, desprendimiento y colapso.

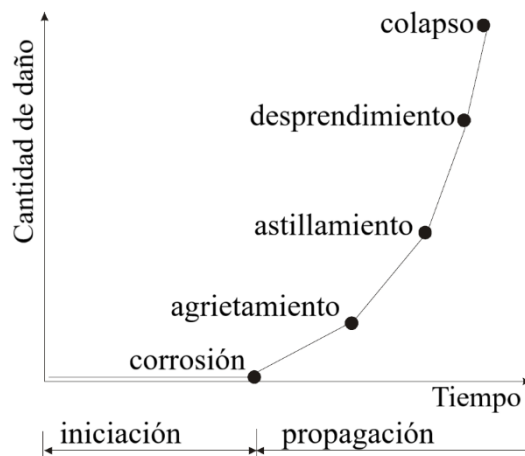


Figura 7. Modelo de Siemes-de Vries, 2002 (reproducido y traducido de Siemes-de Vries, 2002).

En este siglo XXI, ya los diferentes modelos existentes evolucionaron, en especial, al momento de referirse a situaciones específicas. Uno de ellos fue el caso de Melchers, 2006, quien ha publicado diversos modelos, 2003a, 2003b, 2004, aplicados a situaciones específicas de corrosión marina. Uno de sus modelos, que llama la atención es el publicado en 2006 y que se reproduce en la figura 8. Él lo considera como un modelo fenomenológico, basado en la corrosión del refuerzo (en mm).

Este modelo especifica lo que ocurre en la etapa de iniciación enfocado a la difusión de cloruros e hidróxidos. Su etapa de propagación considera evidencias como la reducción del pH y la ocurrencia de la corrosión en ambientes aerobios y anaerobios, propios de corrosión marina, pero refiriéndose exclusivamente al metal desnudo. En su trabajo, Melchers discute los modelos de Tuutti 1982; Weyers et al. 1994; Bentur et al. 1997; François y Arliguie 1999 difiriendo de ellos en que algunos Weyers/Bentur aparentemente confunden la acumulación de productos de corrosión (normalmente no visibles) con grietas (visibles). Por esta razón, Melchers 2006, en su modelo, figura 8, solo representa el comportamiento del acero

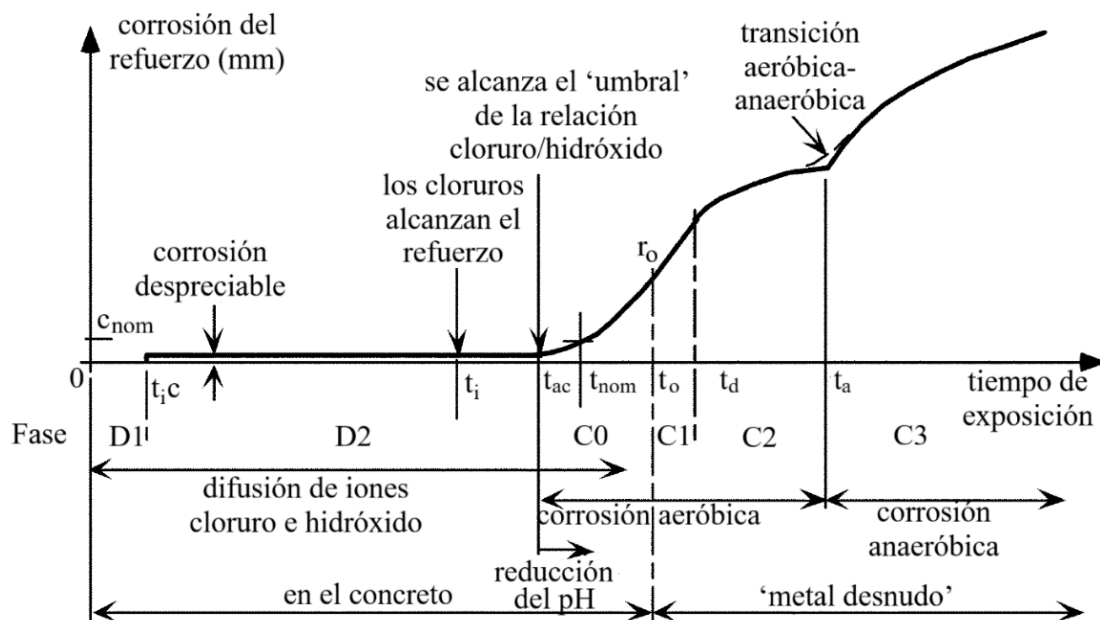


Figura 8. Modelo de Melchers y Li, 2006 (reproducido y traducido de Melchers y Li 2006).

Hasta ese momento, 2006, los diferentes modelos se habían enfocado, en diferentes épocas, a contribuir con lo siguiente:

- Existencia del período de iniciación y propagación.
- Evolución de profundidad de corrosión a degradación, después a cantidad de daño y por último el desempeño.
- Aparición de los estados límite y de diferentes “vidas” de servicio, útil, etc.
- Consideración de un comportamiento estadístico gaussiano en ambos ejes.
- Existencia de varias “vidas” consideradas dentro de las etapas de iniciación y de propagación de Tuutti 1982.
- Considerar todo o parte de lo anterior en modelos conceptuales expofeso a situaciones particulares

Sin embargo, en todos los casos, había la necesidad de acotar la validez de la predicción de cada modelo conceptual al rango de edad al cual fuese confiable. Fue en 2007 cuando Castro y Helene 2007, 2018, presentaron un modelo conceptual que dividía la vida de servicio en 7 etapas, partiendo desde la concepción de la estructura y terminando con su disposición final después de su colapso. En cada una de las etapas de la vida de servicio de este modelo, como serían las etapas 4 a 7, ocurren los distintos tipos de daño que los modelos iniciales y fenomenológicos han contemplado. En la redacción de las características de este modelo se especifica que el mismo tipo de daño, dígame una grieta, puede tener distintos orígenes y a diferentes etapas de vida de la estructura. Este modelo ha tenido vigencia en México (NMX 530, 2018; NMX 569, 2020) y Latinoamérica (Alconpat, 2020). Uno de los aspectos que resalta más el modelo de Castro y Helene 2007, 2018 es que las predicciones de los modelos matemáticos deben estar acotadas a la etapa de vida de servicio en la

que se encuentren. Ya que intentar extrapolar la predicción a etapas de vida diferentes puede afectar sensiblemente su validez y certeza. Para lograrlo, Castro y Helene describen en detalle cada etapa y lo que ocurre en ella a todo nivel, desde lo administrativo y conceptual hasta los límites de cada etapa de vida, figura 9.

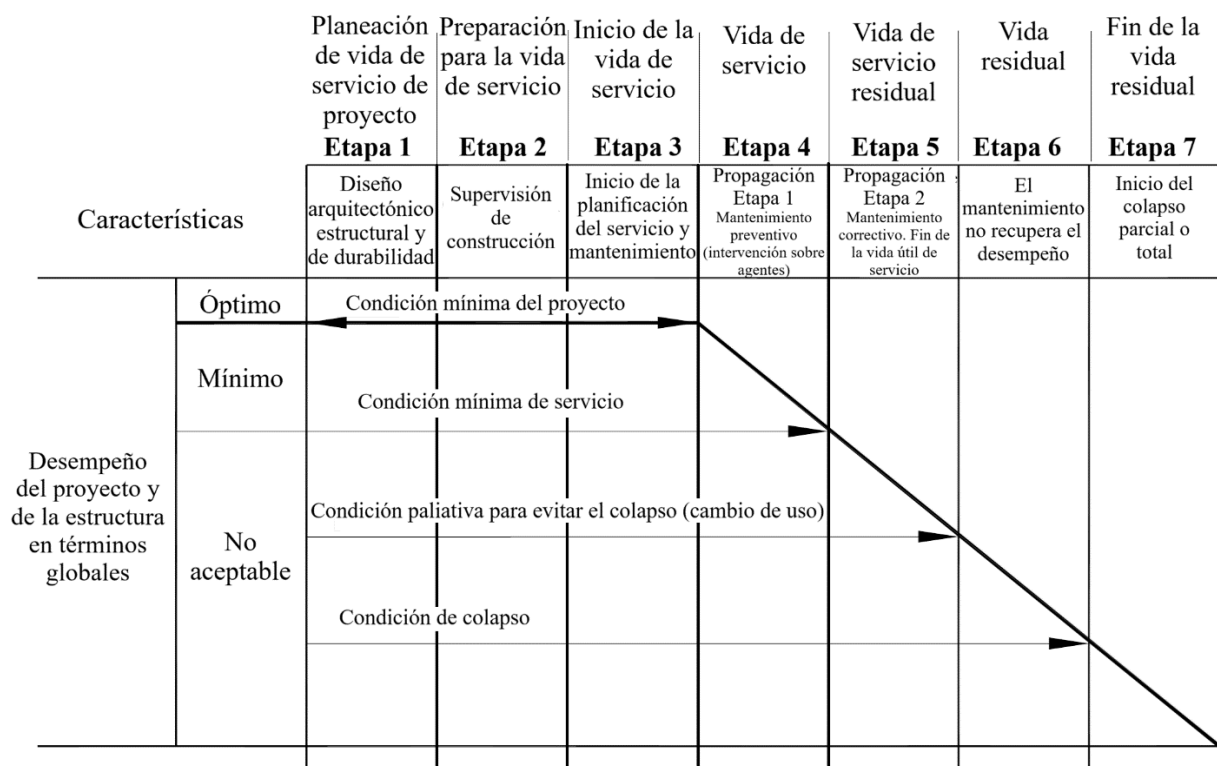


Figura 9. Modelo conceptual de P. Castro and P. Helene (Reproducido de Castro and Helene, 2007, 2018).

Una necesidad del momento era esclarecer lo que significaban las diferentes “vidas” del concreto, así como lo que significaban las definiciones de durabilidad, comúnmente publicadas en diferentes medios. En este sentido, Mendoza-Rangel y Castro-Borges, 2007, publicaron una revisión crítica al respecto, donde también clasificaban los diferentes tipos de modelo conceptual publicados hasta ese momento según su carácter determinístico, semi-probabilístico o probabilístico. En aquel momento, fueron pieza clave para esa revisión contar con las definiciones publicadas por DURAR, 1997; CPD, 1998; NMX 403, 1999; REHABILITAR, 2003; LIFECON, 2003; y CIB, 2004. Las nuevas propuestas de definición ya indicaban que habría que tomar en cuenta tanto los nuevos materiales como el cambio climático.

Ese trabajo buscaba orientar, en forma crítica pero implícita, hacia donde podría dirigirse la evolución de los modelos conceptuales. Ellos mismos, Mendoza-Rangel, Castro-Borges, 2009 publicaron, pero ya en forma ampliada, los riesgos que enfrenta el uso de estos modelos ante las amenazas del cambio climático.

Los modelos conceptuales siguieron evolucionando para situaciones específicas, y de alguna manera incluyendo las aportaciones de los modelos previos, figura 10. En la figura 10 el año de referencia corresponde al trabajo que se cita, pero también se incluyen las citas desde cuando cada autor o autores iniciaron la publicación de sus modelos. Es decir, se aprecia en forma cronológica la evolución, aunque en la práctica algún artículo se publicara antes o después de que ocurrió.

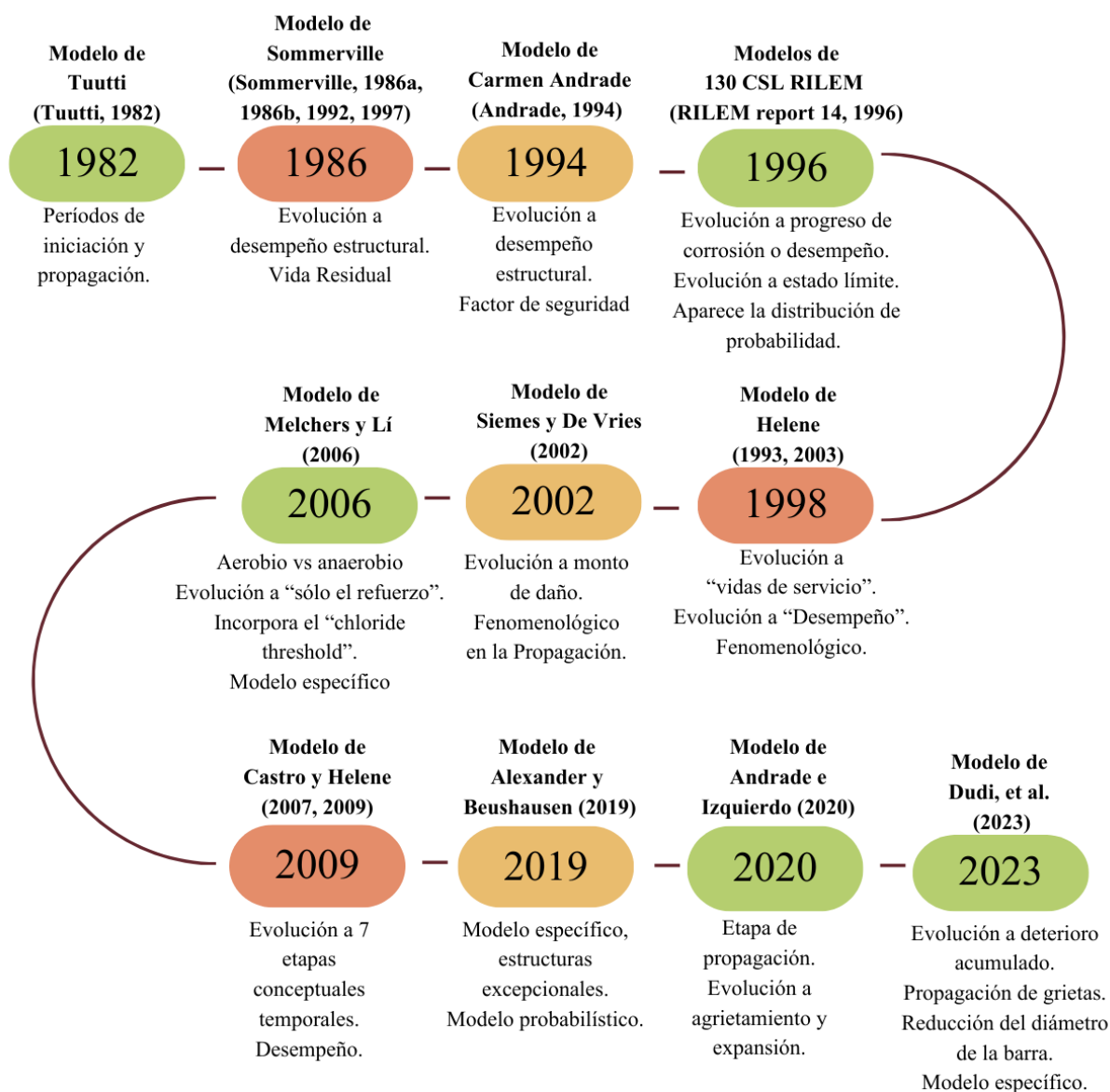


Figura 10. Línea de tiempo ilustrando las aportaciones de los modelos conceptuales en los últimos 43 años.

En la última década (2015-2025) han aparecido modelos que toman como base los anteriores, pero centrándose en necesidades específicas como considerar las rehabilitaciones y reparaciones, y el comportamiento en la etapa de propagación de estructuras no reparadas aún, como en los siguientes casos.

Alexander y Beushausen, 2019, publicaron una revisión muy completa en donde discuten las modificaciones a los modelos conceptuales para incluir partes que consideren las rehabilitaciones de las estructuras. También insisten en que el diseño de la vida de servicio, del modelo, y de la predicción, deben estar claramente relacionados entre sí. En la literatura revisada, Alexander y Beushausen discuten diversos temas relacionados con la vida de servicio, siendo uno de los más interesantes donde plantean que hay modelos que están hechos para estructuras excepcionales, como el de la figura 11, que es un modelo conceptual probabilístico que ellos trabajan en función de las aportaciones de ISO 13823 2008, Siemes y Visser 2000, y DuraCreteR17, 2000. En ISO ha tenido importancia cada modelo conceptual desde inicios de este siglo, ISO 2000, 2001, 2008, 2012. Considerar que este tipo de modelo conceptual, con tinte probabilístico, debe ser calibrado vs un modelo completamente probabilístico, basado en reglas claras de diseño por durabilidad, es

algo en lo que Alexander y Beushausen insisten y que ha permitido que avancen los modelos conceptuales, semi-probabilísticos y probabilísticos, como se ha discutido en las últimas décadas en grupos de trabajo grandes que han dado lugar a modelos bien conocidos como los de DuraCrete, 2017; Life 365, 2005; LIFEPROD, Andrade y Tavares, 2012; fib ModelCode, 2006, 2013, etc.

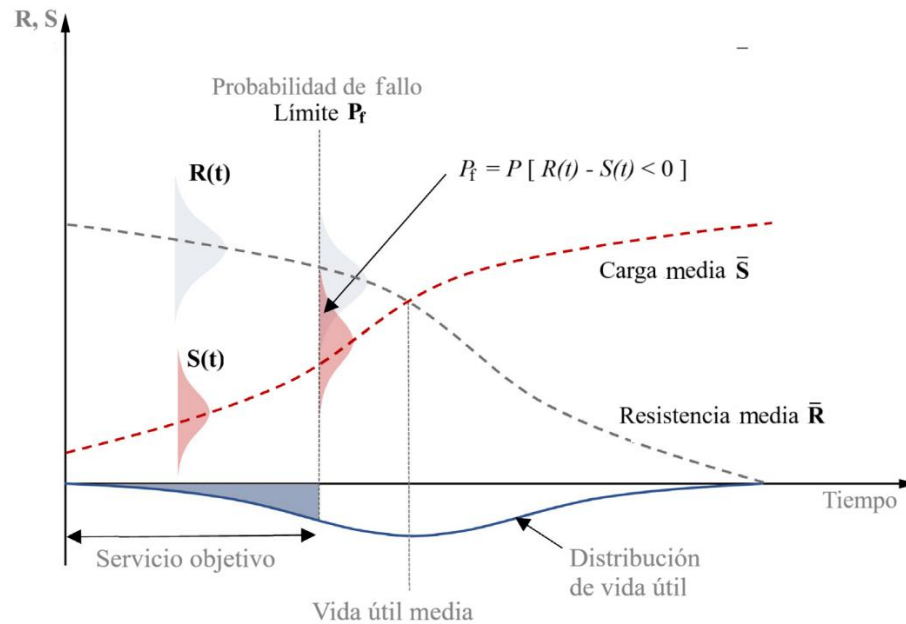


Figura 11. Modelo de Alexander y Beushausen (Reproducido y traducido de Alexander y Beushausen, 2019).

En 2020, Andrade e Izquierdo se enfocan a profundidad a lo que ocurre en la etapa de propagación de Tuutti y en como representarlo en un modelo conceptual, figura 12. Este trabajo tiene diversas aportaciones, siendo la de su modelo conceptual la que contribuye al mejor entendimiento del comportamiento de la expansión y el agrietamiento con el paso del tiempo, específicamente por acción de los sulfatos.

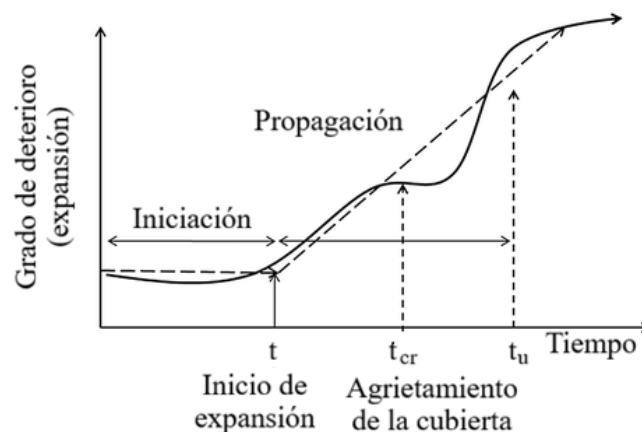


Figura 12. Modelo de Andrade e Izquierdo (Reproducido y traducido de Andrade e Izquierdo, 2020).

Dudi et al, 2023, figura 13, se enfocan a nivel teórico en lo que ocurre en la etapa de propagación. Al igual que Andrade e Izquierdo, 2020, consideran al agrietamiento y su evolución, pero previamente incluyen en la etapa de propagación el comportamiento asociado a la acumulación de productos de corrosión y el taponeo de poros que termina afectando la velocidad de corrosión.

También en 2023, Lai et al propusieron un modelo teórico para incorporar el efecto convección-difusión de cloruros, aunque no lo analizan desde un modelo conceptual.

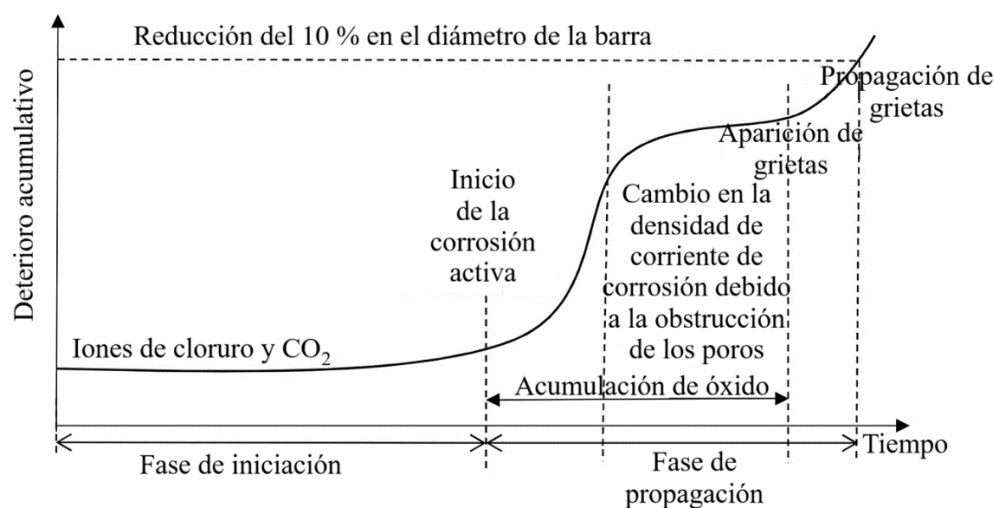


Figura 13. Modelo de Dudi et al (reproducido y traducido de Dudi et al, 2023).

3. PERSPECTIVAS DE FUTURO

Será común ver en el futuro cercano más modelos que se enfoquen en la etapa de propagación, sobre todo porque ésta depende de muchos factores que se asocian a los materiales, al clima y a la calidad de la estructura.

A pesar de la evolución hasta estos tiempos, cada grupo, cada organización y cada autor sigue sus propias convicciones, adaptadas a sus necesidades y proyectos. Lo importante es tener en cuenta lo que significan y lo que buscan diversos conceptos y modelos, al mismo tiempo que la adaptabilidad a materiales, estructuras y costumbres de distintas regiones.

Es importante destacar el papel que han tenido diversas organizaciones internacionales a lo largo de estos años en el desarrollo de modelos, no sólo conceptuales, sino determinísticos, semi-probabilísticos y probabilísticos, cuyos beneficios son ampliamente conocidos (ACI, RILEM, ALCONPAT, CIB, fib, etc). La figura 10 muestra la línea de evolución, que por supuesto aún puede perfeccionarse pues seguro otros modelos valiosos aún no están. En esta línea de evolución, a partir de este siglo XXI, destaca lo siguiente:

- Prescripción vs desempeño
- Compromiso entre diseños de vida de servicio, modelo y predicción.
- Diferenciar bien entre modelo conceptual, empírico (determinístico) o analítico (semi probabilístico o probabilístico).
- Diferenciar bien las etapas de la vida de servicio
- Lo que ocurre en la etapa de propagación (expansión, agrietamiento, etc)
- Inclusión de la rehabilitación o reparación en los modelos

El advenimiento de variables nuevas como nuevos materiales de construcción, el cambio climático, los nuevos cementos, entre otros, plantearán nuevos retos en términos de vida de servicio de las estructuras de concreto. Los modelos conceptuales seguirán evolucionando en función de estas variables nuevas para ambos períodos, el de iniciación y el de propagación.

4. CONCLUSIONES

Se hizo una revisión sobre las contribuciones de algunos de los modelos conceptuales de vida de servicio que se han generado y publicado desde 1982 hasta 2023, 41 años. La evolución ha sido

muy productiva y ha tomado en cuenta con claridad los avances de la industria de la construcción, así como la investigación realizada durante este tiempo. Se discutieron las contribuciones de cada uno enlazando lo nuevo de cada versión hasta tiempos actuales. La línea de tiempo provista contiene las principales contribuciones y las fechas en las que ocurrieron. Se enfatizó que la validez de los modelos, en general, está en función de acotar sus predicciones a etapas temporales de “vidas” de servicio. Los modelos revisados pueden ubicarse fácilmente en alguna de las etapas del modelo conceptual de siete etapas. Los modelos han transitado, en estas cuatro décadas, de lo prescriptivo al desempeño, de lo fenomenológico a lo temporal, y de lo general a lo específico, donde seguirán.

Se concluyó que los modelos conceptuales seguirán evolucionando en función de variables que han tomado fuerza en los años recientes y que tienen que ver con nuevos materiales, nuevos cementos y cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor reconoce a CINVESTAV Mérida y a la SECIHTI el apoyo parcial para llevar a cabo este trabajo. Se agradece el apoyo editorial de M. Balancán y E. Sabido. Las opiniones expresadas aquí son las del autor y no necesariamente las de las agencias que apoyaron. Se agradece a las editoriales que aprobaron la reproducción de algunos modelos de artículos originales, así como a sus respectivos autores a través del servicio de Copyright Clearance Center.

6. REFERENCIAS

- American Concrete Institute - ACI (2000), ACI 365.1R-00: *Service-life prediction, state-of-the-art report*, reported by ACI Committee 365.
- American Concrete Institute - ACI (2017), ACI 365.1R-17: *Report on service life prediction*, Farmington Hills, MI.
- American Concrete Institute - ACI (2005), *LIFE-365, Service life prediction model, computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides*, ACI Committee, vol. 365.
- Castro-Borges, P., Briceño-Mena, J. A., Torres Acosta, A. A. (2020), “*Recomendaciones generales sobre durabilidad*”, Recomendaciones técnicas, Alconpat Internacional, 44pp, <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-01-recomendacionesdedurabilidad>
- Alexander, M., Beushausen, H. (2019), *Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique*, Cement and Concrete Research, Volume 122, Pages 17-29, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>.
- Alonso, C., Andrade, C. (1993), *Lifetime of rebars in carbonated concrete*. Proceedings of the 10th European Corrosion Congress, Barcelona, Progress in the understanding and prevention of corrosion, Vol.1, pp. 634–41.
- Andrade, C., Tavares F. (2012), ‘*LIFEPRED Service life prediction program*’, Ingeniería de Seguridad y Durabilidad S.L., Madrid, Spain.
- Andrade, C., Alonso, C., Gonzalez, I. A., Rodriguez, J. (1989), *Remaining service life of corroding structures*. Proceedings of the IABSE Symposium Durability of Structures, Lisbon, pp. 359–64.
- Andrade, C., Alonso, M. C., Pettersson, K., Somerville, G., Tuutti, K. (1994), *The practical assessment of damage due to corrosion*. Proceedings of Int. Conf. Concrete across Borders 1994, Danish Concrete Association, Odense, pp. 337–50.
- Andrade, C. (1994), *Quantification of durability of reinforcing steel, methods and calculation procedures of concrete technology: new trends*, industrial applications, A. Aguado, R. Gettu and S. P. Shah, Editors. RILEM. Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK ISBN 0 419 20150 5. pp: 158-175.

- Andrade C., Izquierdo D. (2020), *Propagation period modeling and limit state of degradation*, Struct. Concr. 21 (5), 1720–1731.
- Bakker, R. (1994), *Model to calculate the rate of carbonation in concrete under different climatic conditions*. May. Paper no. 104—CEN TC 104/WG1/TGI/Panel 1. Unpublished.
- Bentur, A., Diamond, S. Berke, N. S., (1997), *Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice*, E&FN Spon, London, 201 pp.
- Castro-Borges, P., Helene P. (2007), “*Service life concepts of reinforced concrete structures. New approach*”, A. A. Sagüés, H. Castañeda-López, P. Castro-Borges, A. A. Torres-Acosta Editors in Corrosion of Infrastructure, ECS Transactions, Vol 3, Issue 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 9-14.
- Castro-Borges, P., Helene P. (2018), “*A holistic conceptual approach to concrete service life: a split into different time-stages*”, Revista ALCONPAT, 8(3), pp. 280-287, <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.324>
- CEB Bulletin 148 (1982), *Durability of concrete structures – State-of-the-art report*, CEB, Lausanne, CH.
- CEB Bulletin 152 (1983), *Durability of concrete structures – CEB-RILEM International Workshop – Final Report*, CEB, Lausanne CH.
- CEB Bulletin 182 (1987), *Durable concrete structures – CEB Design Guide*, Second Edition, CEB, Lausanne, CH
- CEB Bulletin 238 (1997), *New approach to durability design – An example for carbonation induced corrosion*, CEB, Lausanne, CH
- CIB-ASTM-ISO-RILEM (1996), *Application of the performance concept in building*. 3rd International Symposium: (Tel-Aviv, Israel, 12/9/96), pp. 6-73 - 6-82
- CIB W80 / RILEM 175 SLM (2004), *Service life methodologies. Prediction of service life for building and components*, Task Group: performance based methods for service life prediction, state of the art reports, March.
- Construction Products Directive (CPD) (1998), *European Community Council 89/106/EWG updated 93/68/EWG*.
- Dudi, L., Krishnan, S., Bishnoi, S. (2023), *Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride*, Journal of Building Engineering, Volume 79, 107867, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107867>.
- RILEM Report (1996), *Durability design of concrete structures*. Report of RILEM Technical Committee 130-CSL. Ed. by A. Sarja and E. Vesikari. London, RILEM Report 14, E & FN Spon, Chapman & Hall.
- Duracrete (1999), *Brite/EuRam report project BE95-1347*, DuraCrete: Probabilistic and performance based design
- DuraCreteR17 (2000), *Final technical report, DuraCrete – probabilistic performance-based durability design of concrete structures*, The European Union–Brite EuRam III, (Document BE95-1347/R17).
- DURAR Network (1997), “*Inspection, evaluation and diagnostic manual of corrosion in reinforced concrete structures*”, CYTED, Iberoamerican Program of Science and Technology for Development, Subprogram XV Environmental Corrosion/Impact about Materials, Maracaibo, Venezuela, CYTED (1997).
- Fagerlund, G., Somerville, G., Tuutti, K. (1994) *The residual service life of concrete exposed to the combined effect of frost attack and reinforcement corrosion*. Proceedings of Int. Conf. Concrete across Borders 1994, Danish Concrete Association, pp. 351–64.
- fib (2006), *Model code for service life design*, Switzerland, fib bulletin 34.
- fib (2013), *Model code for concrete structures 2010*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany.
- Francois, R., Arliguie, G. (1999), “*Effect of microcracking and cracking on the development of*

- corrosion in reinforced concrete members,” Magazine of Concrete Research, V. 51, No. 2, pp. 143-150.*
- Helene, P. (1993), “*Contribución al estudio de corrosión en armaduras de concreto armado*” en Portugués, tesis de Profesor de docencia libre del departamento de Ingeniería de Construcción Civil de la Universidad de Sao Paulo, Brasil
- Helene, P. (1997), “*Vida útil de las estructuras de concreto*”, en IV Congreso Iberoamericano de las Construcciones y VI Congreso de Control de Calidad CONPAT 1997, 21-24 de octubre de 1997, Porto Alegre, Brasil, 30 pp.
- Helene, P. (2003), *The new Brazilian standard NB 1/2003 (NBR 6118) and the Service life of concrete structures* (in Portuguese), University of Sao Paulo PCC USP, (2003).
- ISO, International Organization for Standardization (2000), *ISO 15686-1: Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles and framework*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, International Organization for Standardization (2001) *ISO 15686-2: Buildings and constructed Assets – service life planning – Part 2: Service life prediction procedures*.
- ISO, International Organization for Standardization (2008), *ISO 13823:2008, General principles on the design of structures for durability*, International Organization for Standardization.
- ISO, International Organization for Standardization (2012), *ISO 16204:2012, Durability - service life design of concrete structures*, International Organization for Standardization.
- Kasami, H., Izumi, I., Tomosawa, F., Fukushi, I. (1986) *Carbonation of concrete and corrosion of reinforcement in reinforced concrete*. First Joint Workshop on Durability of Reinforced Concrete, Australia-Japan Science and Technology Agreement, Tsukuba, Japan, 30 September– 2 October, 12 pp.
- Lai, N., Li, L., Yang, C., Li, J. (2023), *Service life of RC seawall under chloride invasion: A theoretical model incorporating convection-diffusion effect*, Ocean Engineering, Volume 279, 114590, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114590>.
- Lifecon Deliverable (2003), “*D3.2: Service life models, Instructions on methodology and application of models for the prediction of the residual service life for classified environmental loads and types of structures in Europe*”, Life cycle management of concrete infrastructures for improved sustainability, Lay, Sascha and Schießl, Peter, authors.
- Melchers, R. E. (2003a), “*Modeling of marine immersion corrosion for mild and low alloy steels—Part 1: Phenomenological model*”, Corrosion, NACE, V. 59, No. 4, pp. 319-334.
- Melchers, R. E. (2003b), “*Mathematical modelling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel*”, Corrosion Science, V. 45, No. 5, pp. 923-940.
- Melchers, R. E. (2004), “*Pitting corrosion of mild steel in marine immersion environment—1: maximum pit depth*”, Corrosion, NACE, V. 60, No. 1, pp. 28-39.
- Melchers, R., E., Li, C. Q. (2006), *Phenomenological modeling of reinforcement corrosion in marine environments*. ACI Materials Journal, Technical Paper. Title no. 103-M04(1). <https://doi.org/10.14359/15124>.
- Mendoza-Rangel, J. M., Castro-Borges, P. (2007), “*Critical review of service life concepts of reinforced concrete structures*”, A. A. Sagüés, H. Castañeda-López, P. Castro-Borges, A. A. Torres-Acosta Editors in Corrosion of Infrastructure, ECS Transactions, Vol 3, Issue 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 3-8, 2007.
- Mendoza-Rangel, J. M., Castro-Borges, P. (2009), *Credibility of concepts and models about service life of concrete structures in the face of the effects of the global climatic change. A critical review*. Materiales de Construcción, 59 (296), 117–124. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.46608>
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (1999), *NMX-C-403-ONNCCE: “Construction Industry – Hydraulic Concrete for Structural Use”*. (in Spanish), México (1999).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

- (2018), *NMX-C-530-ONNCCE: “Industria de la construcción – Durabilidad – Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado – Criterios y especificaciones”*.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2020), *NMX-C-569-ONNCCE: “Industria de la Construcción – Durabilidad del Concreto – Diseño con criterios de durabilidad del concreto utilizado en estructuras de concreto con acero de refuerzo – especificaciones”*.
- Parrot, L. (1992), *Design for avoiding damage due to carbonation induced corrosion*. April. Paper no. 62—CEN TC 104/WGI/TGI/ Panel 1. Unpublished.
- Pihlajavaara, S. E. (1984), *The prediction of service life with the aid of multiple testing, reference materials, experience data, and value analysis*. VTT Symposium 48, Espoo, Vol. 1, pp. 37–64.
- Pihlajavaara, S. E. (1994), *Contributions for the development of the estimation of long-term performance and service life of concrete*. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Espoo, Report 3, 26 pp.+articles 49 pp.
- REHABILITAR (2003), *Manual of concrete structures rehabilitation: “repair, reinforcement and protection”*, Helene, P. And Pereira F., Editors, ISBN 85- 903707-1-2 (2003).
- Sarja A., Vesikaeri E. (1996), “*Durability design of concrete structures*” (Editors). Manuscript of RILEM Report of TC 130-CSL, RILEM Report Series 14, Chapter 7 Durability models. pp: 97-111, E & FN Spon, Chapman and Hall, 165 p.
- Siemes, A., Vrouwenvelder, A., Beukel, A. van Den (1985). *Durability of buildings: a reliability analysis*. Heron, 30(3), 3–48.
- Siemes, T., Vries, H. (2002), *overview of the development of service life design for concrete structures*. 9th International Conference on Durability of Materials and Components (9DBMC-2002), Paper 261. <https://www.irbnet.de> .
- Siemes T., Visser J. (2000), *Low tensile strength in older concrete structures with alkali silica reaction*, Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Quebec City, Canada, June 2000, pp. 1029–1038
- Sjöström, C., Brandt E. (1991), *Collection of In-service Performance data: State-of-the-art approach by CIB W80 / RILEM 100-TSL*, Materials and Structures, Vol. 24, No. 139.
- Somerville, G. (1986a), *The design life of concrete structures (discussion)*. The structural engineer, 64A (9), 233-41.
- Somerville, G. (1986b), *The design life of concrete structures*. The structural engineer, 64A, 60-71.
- Somerville, G. (1992), *The Design life of structures*. Proceedings of the 1990 Henderson Colloquium, organized by the International Association for Bridges and Structural Engineering, July 16-18, 1990, University of Cambridge, Blackie, London.
- Sommerville G. (1997), *Prediction of concrete durability*. In J. Glanville and A. M. Neville, Editors, Proceedings of the STATS 21st anniversary conference, pp. 58-76, E & FN Spon, UK.
- Tuutti, K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 468 p.
- Vesikari, E. (1981), *Corrosion of reinforcing steels at cracks in concrete*. Technical Research Centre of Finland, Espoo. Research Reports 11/1981, 39 pp.+app. 4 pp.
- Vesikari, E. (1988), *Service life of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement*. Technical Research Centre of Finland, Espoo. Research Reports 553, 53 pp.
- Weyers, R. E., Fitch, M. G., Larsen, E. P., Al-Qadi, I. L., Chamberlin, W. P., Hoffman, P. C. (1994), “*Concrete bridge protection and rehabilitation: chemical and physical techniques*”. SHRP-S-668, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 36 pp.