

REFLEXIONES SOBRE LA DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Prof. Dr. Ing. Manuel Fernández Cánovas

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad Politécnica de Madrid

Avda. Prof. Aranguren, s/n.

28040 MADRID (ESPAÑA)

e-mail: mfcanovas@caminos.upm.es

mfcanovas@offcampus.net

Antecedentes históricos.

La primera obra importante de hormigón en masa de la que se tiene noticias, y que ha llegado hasta nuestros días, es la realizada en Roma por Agripa en el año 27 a.C. Concretamente, se trata del Panteón de Roma. Este maravilloso edificio sufrió los efectos de un incendio pero fue reconstruido posteriormente por Adriano en el año 120 de nuestra era. En 609 se transformó en la iglesia de Santa María de los Mártires. Su cúpula de 44 m de luz, aligerada por medio de casetones, no tiene más hueco que un lucernario en la parte superior. En su construcción se utilizó un hormigón realizado con puzolanas, cal y áridos ligeros.

El hormigón se colocó en tres capas siendo la densidad de cada una de ellas decreciente conforme se acercaba al lucernario, y gracias al empleo de áridos de pómez de diferente densidad. Realmente estamos ante una obra de hormigón DURABLE. Una obra que seguiría los cánones predicados por Vitrubio, quién decía que los materiales para construir debían ser: *"resistentes, útiles y bellos"*.

Siguiendo un poco más con la historia, el hormigón armado aparece bastantes siglos después de la mano de Lambot que en el sur de Francia, en 1845, comienza a fabricar objetos en los que combina al cemento y al acero surgiendo de esta forma lo que podríamos denominar como primer hormigón armado. Hay quién dice que el primer hormigón armado lo hizo Joseph Monier al fabricar unas jardineras para rosales con un hormigón al que colocó en su interior alambre de acero. A Monier se le debe la primera patente del hormigón.

Indiscutiblemente Monier, junto con Coignet, con quién estaba asociado, tuvo un papel indiscutible en el desarrollo del hormigón armado como lo demuestra la gran cantidad de objetos fabricados con este material (tubos, vigas, bóvedas, etc.) que presentó en la Exposición Universal de París celebrada el año 1885. Francois Coignet, el socio de Monier, ya había estudiado el papel que correspondía al hormigón y al acero como partes integrantes del nuevo material, publicando los resultados de este estudio en un libro que apareció en 1861 bajo el título "Betons Agglomérés"

A partir de estos años los estudios e investigaciones sobre el hormigón armado se suceden especialmente en Francia, Alemania y Suiza, y posteriormente se van extendiendo al resto de los países y es curioso observar como también a partir de esta época evolucionan los códigos e instrucciones sobre hormigón armado y como su contenido va perfeccionándose con los años sin que por esto los primeros códigos, a pesar de su sencillez, no fuesen suficientemente precisos.

Códigos e Instrucciones sobre hormigón armado.

El primer código de hormigón armado se publicó en Suiza en 1903 bajo el título: “Provisorische Normen für Projektierung, Ausführung und Kontrolle von Bauten in Armiertem Beton”. A éste le siguieron: el alemán aparecido en Prusia en 1904 con el título “Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton in Hochbau”; el francés de 1906, “Circulaire du ministre des Travaux Publics de Postes et des Télégraphes aux Ingenieurs en-chef des Ponts et Chaussées”, circular que contenía unas “Instructions Relatives à l’emploi du Beton Armé”; el inglés de 1907 que se publicó con carácter no oficial denominándose “Report of the Joint Committee on Reinforced Concrete”; el americano aparece en 1910 bajo el título “Standard Building Regulations for the Use of Reinforced Concrete”.

En España la primera Instrucción aparece mucho más tarde, concretamente en 1939, bajo el título: “Instrucción para el proyecto de las obras de hormigón”. Es curioso que en nuestro país tardase tanto en salir un código de hormigón armado, cuando se daba la circunstancia de que el uso del hormigón estaba muy generalizado desde los primeros años del siglo XX, como la demuestra el hecho de las grandes obras públicas realizadas en esa época y el que, por otra parte, en 1918 se implantase en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos la asignatura de Hormigón Armado. Es posible que esto obedezca, como indica J. Calavera, al hecho de que en España el hormigón entró con dos patentes, una la de Hennebique cuyo concesionario era el ingeniero de Caminos Eugenio Rivera y la otra la de Monier cuyo concesionario era el ingeniero militar Francisco Maciá.

La primera Instrucción americana, de 1910, tenía 13 páginas, mientras que la de 1999 sobrepasa las 350 páginas.

La primera Instrucción española de 1939 tenía 43 páginas y un anejo de 7 páginas dedicado a ensayos, mientras que la actual de 1999 tiene 293 páginas y 13 anejos con 148 páginas, lo que hace un total de 441 páginas.

La durabilidad en los Códigos e Instrucciones.

En las primeras Instrucciones la resistencia mecánica del hormigón era el tema prioritario o casi único, si bien muy colateralmente se tocaban aspectos que podemos considerar relacionados con la durabilidad.

De la Instrucción americana de 1910, prácticamente sólo cabe destacar por estar relacionado en mayor o menor grado con la durabilidad, lo siguiente: al hablar de armaduras dice que *“se colocarán en su correcto emplazamiento dentro del encofrado y estarán debidamente fijadas para impedir su desplazamiento”*. Indica, además, que: *“El hormigón se dosificará en la proporción de 1 parte de cemento y 6 partes de árido (fino más grueso) para desarrollar una resistencia a compresión a 28 días de 2000 libras pulgadas por pulgada cuadrada (15,5 Mpa) en probeta de 8x16 pulgadas (20x40 cm)”*. Como tensión de servicio para la resistencia a compresión se indican 650 libras por pulgada cuadrada (5,4 Mpa). Con referencia a los recubrimientos los trata desde el punto de vista de ignifugación, indicando *“Las armaduras principales en pilares deberán estar protegidas por un mínimo de dos pulgadas (5 cm) de hormigón de recubrimiento, las armaduras de viguetas y vigas por una pulgada y media (3,81 cm) y las de los forjados por una pulgada (2,54 cm)”*.

De la Instrucción española de 1939, forzosamente hay que reseñar más aspectos relacionados con la durabilidad que en la anterior, lo cual es lógico si consideramos que es mucho más reciente en el tiempo. En primer lugar hay que señalar que en la propia Instrucción se indica que: *“ésta es de obligado cumplimiento en todas las obras públicas ya se realicen por Administración o por contrata”*.

En esta Instrucción al hablar del agua de amasado, se limita el contenido de SO_3 al 0,3% y el de cloruros sódico o magnésico al 1,0% debiendo tener el agua un pH aproximado de 7.

De los áridos se dice que: *"tendrán igual o superior grado de cualidades de las que se exigen al hormigón fabricado con ellos y estarán exentos de sustancias perjudiciales, de forma que mezclados con un volumen de agua igual al suyo aparente durante 24 horas y concentrado por ebullición al 10 %, continúe el agua cumpliendo las condiciones mínimas exigidas para ella en su empleo en el amasado"*. Aparte de esto, limita también la materia orgánica, cuerpos extraños, limos, arcillas, carbones, escorias de hornos alto y productos con combinaciones de azufre análogas a los residuos de combustión de calderas.

La Instrucción considera a los cementos portland y cementos compuestos en los que entra una adición activa o inerte finamente molida y que se encuentran recogidos en el Pliego de Cementos de 1928.

Con respecto a las cualidades del hormigón indica que *"los hormigones armados expuestos a la intemperie y los hormigones en masa expuestos a la acción de heladas no tendrán una absorción de agua superior al 5 y 6 % en peso, por inmersión de probetas previamente desecadas"*.

Por su relación directa que puede tener con la durabilidad hay que indicar que la Instrucción exige dosificaciones de cemento entre 250 y 400 kg/m³ para hormigón armado y no menor de 150 kg/m³ para hormigón en masa, dando también importancia a la relación agua/cemento al indicar que en la dosificación de los hormigones el cemento se pesará con una tolerancia admisible del 3%, y el agua de tal forma que la tolerancia en la relación agua/cemento sea del 5% salvo en obras delicadas en que será del 3%.

Al curado del hormigón ya lo tiene en cuenta esta primera Instrucción, al decir que: *"el curado manteniendo las superficies húmedas, deberá durar hasta que el hormigón alcance la resistencia prevista o por lo menos 15 días, pudiendo reducirse a 7 días con tiempo húmedo"*.

Considera las acciones agresivas al hormigón, indicando que: *"Las obras que estén en contacto con aguas o sustancias que por su composición química*

puedan atacarle, se protegerán superficialmente, a tal efecto, por enlucidos, pinturas, o si fuera necesario, revestimientos con materiales de construcción que las aislen de este ataque con toda eficacia. En tal sentido deben hacerse protecciones en los depósitos para líquidos y ácidos, para hidrocarburos y para melazas, así como para otros líquidos susceptibles de descomposición”.

Como puede apreciarse, en las instrucciones o códigos poco o nada se hablaba o se especificaba sobre durabilidad, y así ha sido hasta hace muy pocos años, dándose el caso que los proyectistas seguían pensando en que, por el hecho de ser un hormigón resistente ya lo era durable, cosa que como veremos más adelante no es cierta.

La durabilidad depende mucho de la capacidad que tenga el hormigón para permitir que los líquidos y los gases pasen y se muevan en su interior a través de sus poros capilares, es decir depende de su permeabilidad. Los líquidos más comunes son el agua, mientras que los gases son el anhídrido carbónico y el oxígeno. No es de extrañar que en la fase de proyecto de la estructura ya se deba tener en cuenta la presencia de estos elementos.

No hay que pensar que el hormigón de una estructura en su conjunto está sometido a las mismas condiciones, sino que es frecuente que existan zonas con microambientes e incluso microclimas diferentes. Así, en el caso de edificios cerrados puede que la estructura no este sometida a la acción de líquidos o gases agresivos, pero, sin embargo, la misma estructura puede estarlo en determinadas zonas como cocinas, cuartos de baños, o lavanderías en hoteles. En puentes, la propia orientación puede tener efectos diferentes, al igual que en un mismo puente el tablero está más condicionado a los efectos de variaciones térmicas, de ciclos hielo-deshielo, de la acción agresiva de sales descongelantes, y de abrasión, que el resto de su estructura.

Los componentes del hormigón pueden también influir en su durabilidad. Así, un cemento, dependiendo de su tipo, de que lleve o no incorporada adición, y

en el caso en que la lleve del tipo que ésta sea y de su contenido, puede tener un efecto positivo o no sobre la durabilidad. La naturaleza de los áridos afecta a la resistencia a la abrasión, a los ciclos hielo-deshielo, a la reacción árido álcali, etc. Las aguas no potables, e incluso algunas consideradas como potables, pueden tener sustancias perjudiciales que afecten a la durabilidad. Por último los aditivos pueden tener componentes que contribuyan a la corrosión de las armaduras.

El análisis en la elección de los componentes del hormigón debe ser muy estricto cuando se quiere conseguir estructuras durables. Es frecuente encontrarse cuando hay presencia de sulfatos y cloruros, con la tendencia equivocada a emplear cementos tipo V, es decir cementos resistentes a los sulfatos con bajo contenido de C_3A , como ocurre, por ejemplo, en obras marítimas. Este cemento en efecto es muy adecuado frente a los sulfatos pero el peligro de corrosión de armaduras puede ser alto, debido a que parte de los cloruros no se pueden fijar con el C_3A . En este caso quizá fuese mucho más correcto, desde el punto de vista de durabilidad, utilizar un cemento tipo II o tipo I de la ASTM.

Otro ejemplo puede ser lo que ocurre con los hormigones de alta resistencia, de los que se dice que son muy durables. Esto es una verdad sólo a medias, dado que al utilizar estos hormigones mucho cemento existe un mayor peligro de fisuración por retracción, que se agrava aun más si se tiene en cuenta que la cantidad de agua de amasado no suele bajar con respecto a los tradicionales, pues aunque la relación a/c sea baja el contenido de cemento es elevado. Por último, estos hormigones son menos dúctiles, o sea mucho más frágiles que los tradicionales y con mayores peligros de fisuración térmica, dado las altas temperaturas que alcanzan en su interior.

Cuando se habla de durabilidad del hormigón hay que pensar que en ella no solamente influye el diseño del hormigón para ejercer su función en unas condiciones determinadas, sino que también influye en la misma, la puesta en

obra, el curado, y la forma y diseño de los elementos estructurales. Por otra parte, hay que tener en cuenta que la durabilidad de una estructura debe permanecer a lo largo de su vida útil lo que exige la existencia de un "mantenimiento preventivo" de la misma, es decir de una acción encaminada a corregir los pequeños desperfectos y a evitar que haya que ir a un "mantenimiento correctivo" con reparación que pueden ser costosas.

El mantenimiento preventivo obliga a inspecciones periódicas realizadas por personal suficientemente capacitado y con conocimientos amplios, no sólo del comportamiento del hormigón frente a las acciones agresivas de tipo físico o químico sino también del comportamiento mecánico de la estructura.

En la durabilidad de un hormigón o de una estructura realizada con él, juega un papel primordial el control de calidad, control que no puede limitarse al producto terminado, como puede ser la determinación de su resistencia a compresión en probetas de hormigón, sino a todos los componentes del mismo. Cuantas veces nos encontramos con un hormigón cuyas probetas dan muy buena resistencia a 28 días y sin embargo, se ha confeccionado con áridos que tenían cloruros por encima de los valores admisibles, o se han utilizado en ellos áridos con sulfuros oxidables, etc. Se da incluso el caso del empleo de aguas de la red de abastecimiento de determinadas localidades que no cumplen con los límites de cloruros indicados en las Instrucciones.

El control no sólo es imprescindible para el hormigón y sus componentes sino que debe extenderse a todas las fases de la ejecución de la estructura.

Durabilidad.

El celebre arquitecto e ingeniero militar Vitrubio, autor del libro "De Arquitectura", allá por el siglo I A.C, reinando en Roma Augusto, escribía algo que a nosotros como profesor durante muchos años de Materiales de Construcción nos ha hecho pensar mucho y tenerlo siempre muy presente en

nuestra enseñanza. Decía que los materiales para construir debían ser: "Resistentes, útiles y bellos". Estas tres palabras pueden ser el compendio de todo un tratado sobre materiales, incluyendo incluso la *durabilidad* de los mismos dentro del concepto de *utilidad*.

El Diccionario de la Lengua Española define a Durabilidad, como: "*Calidad de durable*", Durable: "*Duradero*". Duradero: "*Dícese de lo que dura o puede durar mucho*". Durar: "*Continuar siendo, obrando, sirviendo, etc.*" Esto es, exactamente, lo que pedimos a nuestro hormigón cuando decimos que sea durable.

Por su parte, la vigente Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) en su artículo 37 indica: "*La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural.*

Una estructura durable debe conseguirse con una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura.

Una estrategia correcta para la durabilidad debe tener en cuenta que puede haber diferentes elementos estructurales sometidos a diferentes tipos de ambiente".

El Eurocódigo 2, en su apartado 4.1.1, indica: "*Una estructura es durable si a lo largo de su vida prevista, cumple con su función en lo que respecta a servicio, resistencia y estabilidad sin una pérdida considerable de utilidad y sin un mantenimiento no previsto excesivo*"

La Guía del ACI para hormigón durable "Guide to durable concrete" (ACI 201), indica: "*Durabilidad es la capacidad del hormigón de resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Esto puede incluir la exposición a los ciclos hielo deshielo, humedecido y secado,*

calentamiento y enfriamiento, al agua de mar, a los sulfatos solubles del suelo y a los agentes químicos tales como sales de deshielo y fertilizantes.

Cuando el hormigón deba tener un diseño especial, será necesario especificar la resistencia que deberá tener a una edad temprana particular. Sin embargo, la durabilidad puede ser el factor que controle la calidad del hormigón. La elección de la resistencia especificada, por si solo, no siempre asegura una adecuada resistencia al deterioro por los ciclos hielo deshielo, ataque de sulfatos o exposición al agua de mar. Una mezcla con una adición de aireante bien dosificada es siempre esencial para conseguir una adecuada durabilidad".

El Manual del Hormigón chileno, publicado por el Instituto Chileno del cemento y del Hormigón, al hablar de durabilidad la define de la siguiente forma: *"La durabilidad es la cualidad que poseen los hormigones de soportar las condiciones para las que fueron diseñados sin sufrir deterioros durante su vida útil prevista.*

Diversos factores afectan a la durabilidad del hormigón, que se relacionan directamente con la bondad de los procesos de selección de materiales, mezclado, compactación y curado del hormigón".

La primera referencia que existe de estudios de durabilidad, según M. Hamada, es del año 1907 y trata sobre el comportamiento durante 20 años de probetas enmoldadas. Por su parte, Hognestad relata un estudio que puede ser el primero que se hiciese sobre vida útil, que se llevó a cabo en 1972, en un hormigón destinado a depósito de petróleo en el mar.

Vida útil.

La "vida útil" de una estructura se define en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), como: *"Periodo de tiempo, a partir de su puesta en servicio, durante el que la estructura debe mantener unas condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptables".*

La misma Instrucción española indica que. *"Durante este tiempo requerirá una conservación normal adecuada, pero no operaciones de rehabilitación. La Propiedad de las Obras debe establecer la vida útil esperada con carácter previo al inicio del proyecto."*

Según lo anterior, la vida útil de una estructura sería el periodo de tiempo en el cual la estructura, respetadas las medidas de mantenimiento preventivo, mantiene sus características de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptable. Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento en que la estructura alcanza el anterior límite aceptable.

Hace años una vida útil de servicio de 25 años en estructuras de edificios se podía considerar como aceptable, hoy día ésta ha pasado a ser de 50 años para las obras corrientes, pero dado que el hormigón ha extendido su campo de acción a aplicaciones mucho más importantes desde el punto de vista social y estructural (túneles bajo el mar, determinados puentes, algunas edificaciones, etc.) la demanda exigida a la vida útil ha aumentando llegando frecuentemente a los 100 años, con lo cual las exigencias de durabilidad a largo plazo se han hecho más críticas.

El Código Modelo CEB-FIP (1990) indica que las medidas necesarias para garantizar la vida útil prevista estará de acuerdo con las condiciones ambientales y la importancia de la estructura, añadiendo que los responsables del diseño de la estructura se deberán encargar de las medidas mínimas de inspección y mantenimiento preventivo necesarias para asegurar la vida útil de diseño acordada.

Es cierto que hoy día se conocen mucho mejor los mecanismos de agresión al hormigón, al igual que el conocimiento de la estructura interna del mismo y de los factores que la afectan es mucho más extenso. Concretamente, en el caso de la corrosión, que es una de las causas que más y con mayor gravedad pueden afectar a las estructuras, el conocimiento que se tiene de la permeabilidad del

hormigón frente al anhídrido carbónico o a la difusión de los cloruros externos, o a los procesos electroquímicos que afectan a la corrosión, es muy preciso, al igual que también lo es el conocimiento de los medios que hay que tomar para hacer hormigones impermeables.

El predecir la vida útil de las estructuras es un tema complejo que sigue en proceso de investigación y sobre el que se trabaja en muchos países. Concretamente, los grupos de investigación que se encuentran más involucrados en este tema son los comités CIB-RILEM: “Committee 130 CSL. – Calculation Methods for Service Life Design of Concrete Structures”, el “Committee 140 TSL.- Prediction of Service Life of Buildings Materials and Components” y el comité del ACI: “Committee 365.- Service Life Prediction”. La mayoría de los trabajos existentes en la actualidad fundamentan el análisis de la vida útil de una estructura en la teoría de la durabilidad y de la fiabilidad estructural. La durabilidad se considera a través de los mecanismos de deterioro del hormigón bien por ataques químicos, físicos, o por efectos electroquímicos, como es el caso de corrosión de armaduras, mientras que en la fiabilidad estructural juega un papel importante la evaluación y predicción de respuesta de la estructura a lo largo del tiempo.

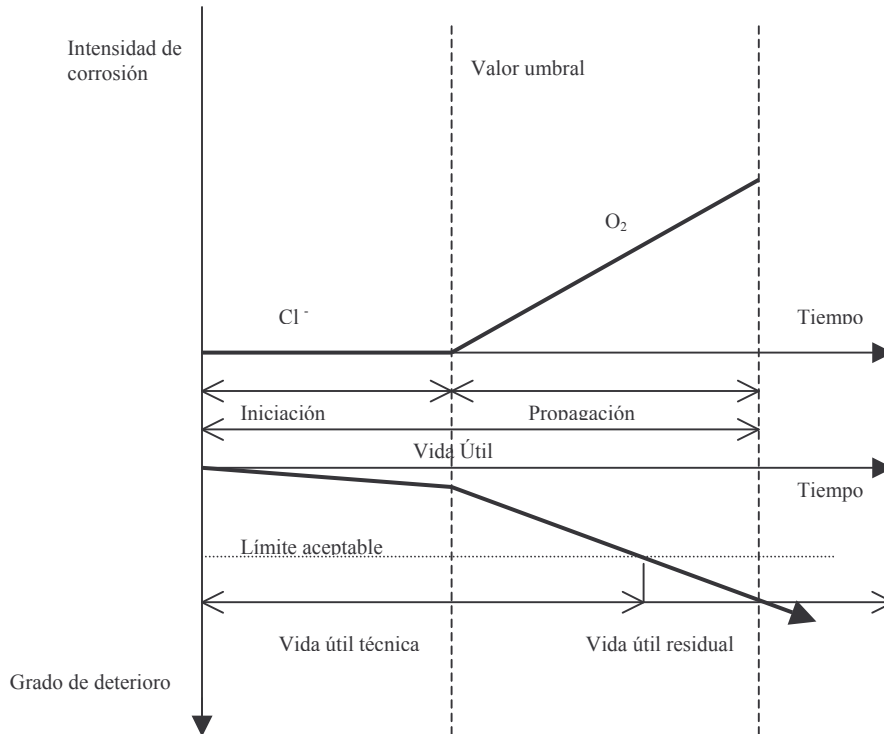
Existe una tendencia a utilizar los métodos tradicionales como opción en los análisis relacionados con la vida útil de las estructuras. Según estos métodos basados muchos de ellos en la experiencia y que son los de uso más común, la información disponible sobre la vida útil estarían limitadas al campo empírico y alcanzar un grado suficiente de durabilidad implicaría mayores costes de construcción sin un conocimiento adecuado sobre la reducción en los costos de mantenimiento y reparación. Otras desventajas de los métodos tradicionales se refieren a la frecuente disociación entre las especificaciones y el comportamiento de las estructuras, dándose el caso de que, en ocasiones, las limitaciones normativas se presentan como muy conservadoras y, en otros, no se adecuan a las solicitaciones ambientales a las que esta sometida la estructura.

El concepto de vida útil debe aparecer ya en la fase de diseño estructural, definiendo los requisitos de seguridad, funcionalidad y apariencia que debe tener una determinada estructura durante un determinado periodo de tiempo, sin presentar costos inesperados de mantenimiento. Los conceptos básicos basados en la resistencia frente a las solicitaciones mecánicas se deben hacer extensivos a los de durabilidad, de tal forma que se incluyan las solicitaciones de tipo agresivo a las que va a estar expuesta la estructura.

Hay que decir que la comunidad técnica está cada vez más concienciada hacia los problemas de la durabilidad como lo demuestra el hecho del empleo cada vez más frecuente de la utilización de métodos deterministas con base científica que se basan en el conocimiento de los mecanismos de transporte de agentes agresivos (gases, líquidos o iones) en el hormigón. En el caso de corrosión de armaduras el modelo más utilizado se suele dividir en dos partes: una la comprendida hasta la despasivación del acero y la otra a la etapa posterior a la misma.

Como herramientas modernas y realistas de base científica orientadas hacia el diseño de vida útil a través del concepto de durabilidad cabe destacar los métodos estocásticos.

Tutti, en 1982 estableció su método dirigido fundamentalmente a estructuras expuestas al ambiente marino. En su modelo Tutti considera la vida útil técnica compuesta por dos periodos fundamentales. El primero corresponde al proceso de iniciación de deterioros significativos en el material, y el segundo a la propagación del proceso de deterioro. En este modelo, que es muy sencillo en el caso de deterioro por corrosión de armaduras, en el periodo de iniciación se rompería la capa protectora debido a la penetración de cloruros, siendo la vida técnica función del tiempo correspondiente a este fenómeno.



Los métodos tradicionales empleados en el diseño de estructuras no cuantificaban el periodo de vida útil. Los códigos actuales prestan mucha atención a la durabilidad como base de la vida útil estableciendo limitaciones en la composición del hormigón, en el espesor mínimo de recubrimiento, en la definición de la achura máxima permisible de fisuras, etc. En las últimas décadas, se ha dedicado un gran esfuerzo a la creación de modelos y métodos de predicción de la vida útil, muchos de los cuales ya han madurado lo suficiente aportando un nivel adecuado de fiabilidad. En los métodos más precisos, como se ha comentado anteriormente, se presenta la vida útil como una medida estocástica asociada a los márgenes de seguridad de diseño y al igual que como se hace en el calculo mecánico de estructuras. Estos márgenes de seguridad están definidos por propuestas probabilísticas de modelos para la predicción de la vida útil, con lo cual

el diseño desde el punto de vista de vida útil se presentaría como una extensión del diseño estructural.

En los modelos probabilísticos las distribuciones de los parámetros más empleadas son: la distribución normal, la log-normal, la distribución beta y, los valores extremales. Los parámetros que no están asociados a comportamientos estocásticos, como pueden ser el periodo de referencia, el tiempo de exposición, el factor de ejecución, etc., lo están a métodos deterministas. En aras a la simplificación se suele recurrir al método de distribución normal, aún a sabiendas de que determinadas variables, como puede ser el recubrimiento de armaduras, se adaptan mejor a la distribución tipo log-normal.

Independientemente de la técnica empleada, la propuesta probabilística para análisis de la fiabilidad aplicada a la seguridad de las estructuras se puede caracterizar como una relación entre dos variables aleatorias R y S, representando la resistencia y la sollicitación que afectan a la estructura, respectivamente. Cuando $R = S$ se alcanza el estado límite último y debe ocurrir el agotamiento. La fiabilidad Z, de acuerdo con el anterior razonamiento, vendrá dada por la función: $Z = R - S$.

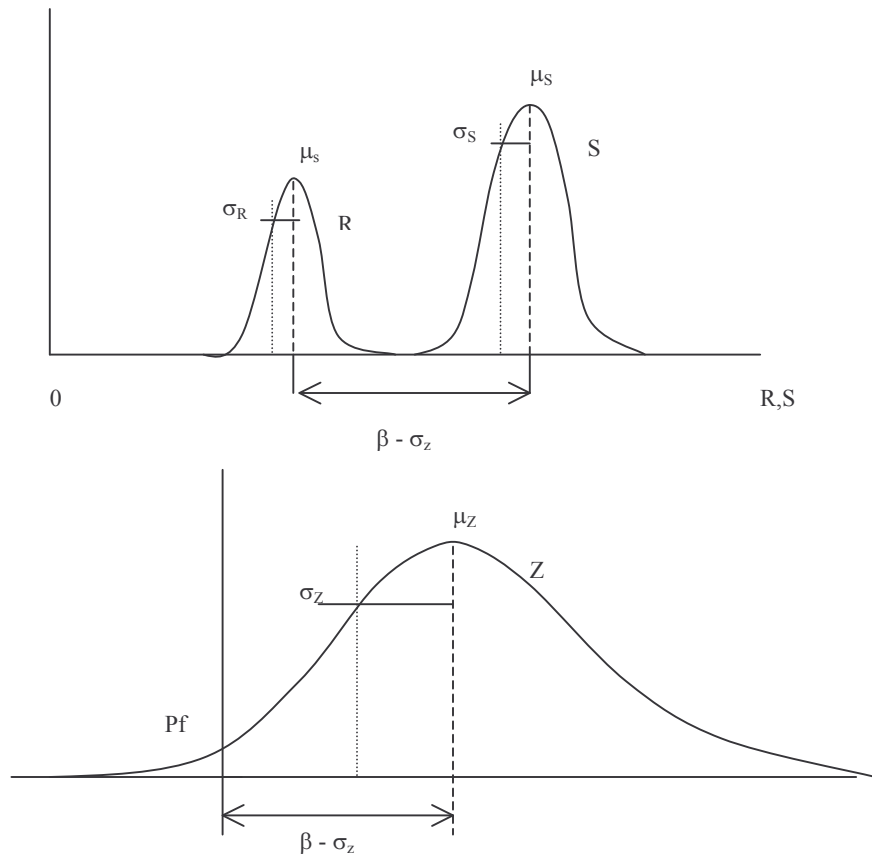
De acuerdo con lo anterior es posible distinguir las siguientes situaciones de fiabilidad Z:

$Z > 0$. La estructura se encuentra en estado satisfactorio ($R > S$)

$Z = 0$. La estructura ha alcanzado su estado límite ($R = S$)

$Z < 0$. La estructura está en estado adverso ($R < S$).

Representando las tres variables que intervienen en el proceso probabilístico tendríamos el siguiente gráfico:



donde:

Pf = Probabilidad de fallo.

$\beta = (-\mu_Z/\sigma_Z)$ = Índice de fiabilidad.

μ_Z, μ_R, μ_S = Valores medios de las variables Z, R y S.

$\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_S$ = Valores de las desviaciones estandar de Z, R y S.

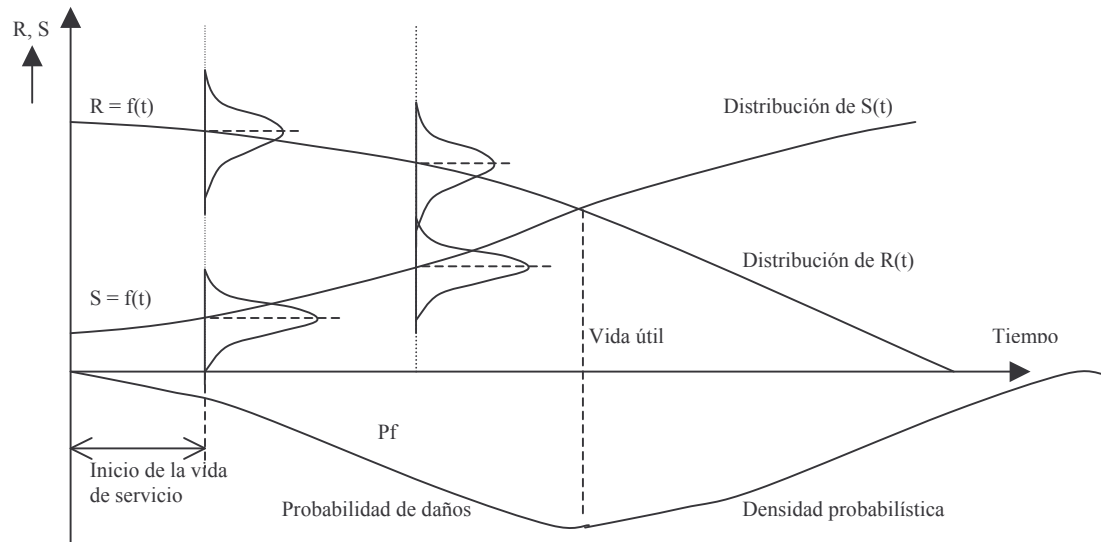
Z = Fiabilidad.

R = Resistencia.

S = Solicitud.

La probabilidad de fallo es $Pf = \Phi(-\beta)$, siendo β el índice de fiabilidad.

Si analizamos la evolución de la fiabilidad a lo largo del tiempo, tendríamos una gráfica como la indicada a continuación:



En el caso de una plataforma "offshore" de Brasil (tesis doctoral de Alexandre da Costa Pereira) se han tomado como variables dependientes: la probabilidad de fallo o corrosión P_f (%) y la vida útil t (en años) y como variables independientes las espaciales (orientación N,S,E,O y la cota) y las características del material empleado.

En el análisis se hicieron ensayos de porosidad en porosímetro de Hg, resistencia a la compresión, absorción capilar, difusión de Cl^- , penetración de agua a presión y esto en los hormigones que estaban orientados según los cuatro puntos cardinales. Con esto se obtuvieron unas curvas de distribución normal y de probabilidad acumulativa para los cuatro costados de la plataforma en función de la profundidad y (mm) para la cual el contenido de cloruros alcanzaba un valor igual o mayor del considerado como crítico (normalmente 0,4 % del Cl^- respecto a la masa de cemento).

La profundidad de los recubrimientos se determinó en testigos extraídos y las determinaciones de características permeables del hormigón se realizaron sobre rodajas cortadas a distinta profundidad de estos testigos.

Los resultados obtenidos de la vida útil de la plataforma aplicando el método probabilístico concuerdan con bastante precisión con los datos de deterioro que se tenían registrados en las inspecciones que se habían realizado a la plataforma durante los veinticinco años que lleva en funcionamiento, observándose como la orientación tenía una influencia vital en el comportamiento de la plataforma, de tal forma que mientras el costado situado en la orientación Oeste había tenido una vida útil de 14 años, el situado en la cara Este la tenía superior a los 25 años.

La durabilidad según códigos de diferentes países.

Por la importancia que tiene en la determinación de la vida útil de una estructura la durabilidad del hormigón armado, en lo que sigue vamos a realizar una comparación de los aspectos relacionados con la misma que tocan las Instrucción o Códigos del hormigón armado de diferentes países tales como EE.UU, España y CEE.

a.- EE.UU.

El "Código de Diseño de Hormigón Armado" (ACI 318-99) dedica su Capítulo 4 a "Requisitos de Durabilidad".

En 1989 se modificaron los capítulos 4 y 5 con la finalidad de resaltar la importancia que tienen los requisitos de durabilidad a fin de que el proyectista seleccione la resistencia especificada f'_c y el recubrimiento de la armadura.

En primer lugar conviene indicar que el ACI 318 considera que la resistencia mínima especificada f'_c del hormigón a utilizar con fines estructurales no debe ser inferior a 17,5 Mpa.

Indica el código que, las relaciones a/c máximas de 0,40, 0,45 y 0,50 que pueden requerirse para hormigones expuestos a ciclos de hielo-deshielo, a suelos con aguas con sulfatos o para prevenir la corrosión, son típicamente equivalentes a exigir para f'_c un valor de 32,2, 31,5 ó 28,0 Mpa respectivamente. Normalmente, para conseguir estas resistencias especificadas se requiere una resistencia media de 3,5 a 4,9 Mpa superior. Dado que es difícil determinar con precisión la relación a/c durante la producción, el valor de f'_c especificado debe ser razonablemente consistente con la relación a/c requerida por razones de durabilidad. Lo anterior, es decir que la selección de un valor de la resistencia especificada sea consistente con la relación a/c, ayuda a asegurar que la relación a/c requerida pueda conseguirse efectivamente en la obra. Así, para una estructura de aparcamientos al aire libre no debe especificarse un valor de f'_c de 20 Mpa y una relación a/c máxima de 0,45 si esta obra va a estar expuesta a sales descongelantes.

El código indica en tablas, para cada tipo de exposición unos límites de relación a/c máxima y una resistencia especificada f'_c mínima, y en su caso otras condiciones. Así, para un hormigón expuesto a ciclos hielo-deshielo se obtiene el contenido de aire ocluido, en tanto por ciento, de acuerdo con el tamaño máximo del árido y de que la exposición sea moderada o severa, dando además la relación a/c máxima y la resistencia f'_c mínima de acuerdo con las condiciones de exposición. Concretando más el caso anterior tendríamos que para un hormigón expuesto ciclos hielo-deshielo en condición húmeda, o a productos químicos descongelantes y en exposición severa, con árido de tamaño máximo 19,0 mm, se debe elegir una relación a/c máxima de 0,45 y una resistencia f'_c mínima de 31 Mpa, con un porcentaje de aire ocluido del 6%. Si se utiliza una ceniza volante, su porcentaje máximo en peso sobre el material sería del 25%.

Con respecto a la protección de las armaduras frente a la corrosión, que es un tema muy preocupante en estructuras próximas a la costa, en su artículo 4,4 el ACI 318 indica que las concentraciones máximas de iones cloruros acuosolubles,

determinadas de acuerdo con la norma ASTM C1218, en hormigón endurecido a las edades que van de los 28 a 42 días y provenientes de los compuestos: agua, áridos, cemento, adiciones y aditivos, no excederán los límites indicados en la tabla 1.

Tabla 1.-Contenido máximo de cloruros

Tipo de elemento	Cl⁻ en porcentaje de cemento
Hormigón pretensado.	0,06
Hormigón armado que en servicio estará expuesto a cloruros.	0,15
Hormigón armado que en servicio estará seco o protegido de la humedad.	1,00
Otras construcciones de hormigón armado.	0,30

Continua el código indicando que: *"cuando el hormigón con armaduras vaya a estar expuesto a sales descongelantes, agua salobre, agua de mar o salpicadura de la misma, deberán satisfacerse los requisitos de la siguiente tabla, para las condiciones de relación a/c y resistencia especificada f'_c para los requisitos de recubrimiento mínimo del hormigón que se dan en el artículo 7,7".*

La tabla a la que hace referencia es la tabla 2.

Tabla 2.- Límites en la relación a/c y resistencia especificada según la clase de exposición.

Condiciones de exposición	Hormigón con árido de peso normal. Relación a/c máx (en peso)	Hormigón con árido de peso normal o ligero. f'_c mín (en Mpa)
Hormigón que pretende tener baja permeabilidad en exposición al agua.	0,50	28
Hormigón expuesto a congelación y deshielo, en condición húmeda o con productos químicos descongelantes.	0,45	31
Para proteger de la corrosión a la armadura en el hormigón expuesto a cloruros de sales descongelantes, sal, agua salobre, o salpicaduras del mismo origen	0,40	35

Con respecto a los recubrimientos mínimos el ACI 318 en su artículo 7.7 considera los tres casos siguientes (siempre en hormigón no pretensado): hormigón colocado contra el suelo y permanentemente expuesto a él, hormigón expuesto al suelo o al aire libre, y el hormigón no expuesto al aire libre ni en contacto con el suelo. En el primer caso, para hormigón supone un recubrimiento mínimo de 70 mm. En el segundo, considera que las barras tengan diámetro entre 18 y 56 mm en cuyo caso fija el mínimo en 50 mm, o que éstas sean barras de 16 mm, alambre de 16 mm y diámetro menor, en cuyo caso el recubrimiento mínimo pasa a 40 mm. En el tercer caso, considera: en primer lugar, las losas, muros y nervaduras, en los que si las barras son de 44 a 56 mm de diámetro el recubrimiento mínimo es de 40 mm y si las barras son de 36 mm o menos el recubrimiento es de 20 mm; en segundo lugar, las vigas y pilares cuya armadura principal, estribos o zunchos tendrán un recubrimiento mínimo de 40 mm; en tercer lugar, las cascaras y placas delgadas en las que si las barras son de 18 mm o

mayor diámetro el recubrimiento mínimo es de 20 mm y si las barras son de 16 mm o los alambres de 16 mm o menos el recubrimiento pasa a ser de 15 mm.

En ambiente corrosivo, es decir cuando el hormigón vaya a estar expuesto a fuentes externas de cloruros, tales como sales descongelantes, agua de mar, agua salobre, o salpicaduras de estas fuentes, aparte de dosificarse de acuerdo con estas condiciones, los recubrimientos recomendados mínimos de la armadura deben ser de 50 mm para muros y losas y de 60 mm para otros elementos. Para hormigón prefabricado en condiciones de control de planta, se recomienda un recubrimiento mínimo de 40 y 50 mm, respectivamente.

El curado lo toca el ACI 318 de una forma muy simple, diciendo que: el hormigón que no sea de alta resistencia inicial, se mantendrá por encima de los 10°C y en condiciones húmedas al menos durante los 7 primeros días después de su colocación, excepto en el caso de curados acelerados. Si el hormigón es de alta resistencia inicial, ese tiempo mínimo se reducirá a 3 días.

b- España.

Como se ha indicado anteriormente, el código vigente en España desde Julio de 1999 es la Instrucción de Hormigón Armado (EHE).

En primer lugar hay que indicar que la resistencia característica mínima a compresión de calculo exigida para hormigón armado y pretensado en ambiente no agresivo es de 25 Mpa, siendo la mínima para hormigón en masa la de 20 Mpa.

Una novedad interesante es que en cada proyecto, el hormigón a utilizar en él si la clase de exposición es uniforme, y sino es así, los hormigones a utilizar de en las diferentes clases de exposición de la obra, se deben definir mediante una tipificación que se ha dado en llamar en el mundo de la construcción de nuestro país, como "matricula del hormigón". En definitiva, la tipificación obedece al siguiente formato:

T- R/C/TM/A.

- T Indicativo que será HM para hormigón en masa, HA para hormigón armado y HP para hormigón pretensado.
- R Resistencia característica especificada, en Mpa.
- C Letra inicial del tipo de consistencia (S seca, P plástica, B blanda, F fluida).
- TM Tamaño máximo del árido, en mm.
- A Designación del ambiente de acuerdo con lo que se indica más adelante.

La Instrucción española EHE clasifica las clases de exposición en las que el hormigón va a desarrollar su función en dos tipos: uno que denomina “clases generales de exposición” y otro llamado “clases específicas de exposición”. En el primer tipo, se recogen el ambiente no agresivo y aquellos otros que pueden dar lugar a corrosión de armaduras, y en el segundo, los que pueden provocar el deterioro del hormigón por ataques químicos, físicos o mecánicos.

Resumiendo esquemáticamente estas clases de exposición, tendríamos:

- ✓ Clases generales de exposición (CG):
 - I No agresiva
 - II Normal (a, b, según humedad relativa). Dan lugar a corrosión de armaduras por carbonatación del hormigón.
 - III Marina (a,b,c: aérea, sumergida, carrera de marea). Dan lugar a corrosión de armaduras por presencia de cloruros marinos.
 - IV Cloruros no marinos. Dan lugar a corrosión de armaduras.
- ✓ Clases específicas de exposición (CE):
 - Q Agresividad química (a,b,c: ataque al hormigón débil, medio, fuerte)
 - H Heladas sin sales fundentes (acción ciclos hielo-deshielo)
 - F Heladas con presencia de sales fundentes.
 - E Erosión.

El ambiente en que esta situada la estructura viene fijado por:

$$A = CG + \Sigma(CE_i).$$

Por la repercusión tan desfavorable que los cloruros tienen en la durabilidad del hormigón armado y pretensado, la Instrucción EHE, limita el contenido de cloruros en cada uno de los componentes del hormigón, indicando además que el contenido total de ion cloruro aportado por los componentes no podrá exceder de 0,4 % en caso de hormigón armado, y 0,2% en el de hormigón pretensado, siempre sobre masa de cemento.

Dependiendo de la clase de exposición a la que esté sometido el hormigón, se establecen unos contenidos mínimos de cemento y unas relaciones a/c máximas a las cuales corresponderá aproximadamente una determinada resistencia característica a compresión, y decimos aproximadamente debido a que ésta va a depender, para igual dosificación de cemento, de la clase resistente de éste. En las tablas 3 y 4 pueden verse los contenidos mínimos de cemento y máximas relaciones a/c para las diferentes clases de exposición, y las resistencias mínimas compatibles con estos límites.

Tabla 3.- Relaciones máximas a/c y contenido mínimos de cemento en función de la clase de exposición

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación a/c.	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300

Tabla 4.- Resistencias características mínimas recomendadas en función de la clase de exposición

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN												
		I	Ila	Iib	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia mínima (Mpa)	Masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

Con respecto a los recubrimientos, éstos los fija la Instrucción EHE por razones de durabilidad de acuerdo con la siguiente expresión:

$$r_{nom} = r_{min} + \Delta r,$$

en la que:

r_{nom} es el valor del recubrimiento nominal

r_{min} es el valor del recubrimiento mínimo, y

Δr es un margen de recubrimiento que depende del control de calidad. Su valor es de:

- ◆ 0 mm para elementos prefabricados con control de ejecución intenso,
- ◆ 5 mm para elementos construidos *in situ* con control de ejecución intenso.
- ◆ 10 mm para otros casos.

Los valores mínimos r_{min} del recubrimiento dependen de la clase de exposición en la que esté el elemento estructural y de la resistencia característica del hormigón, según puede apreciarse en la tabla 5:

Tabla 5.- Recubrimientos mínimos en función de la clase de exposición

Resistencia	Tipo de elemento	RECUBRIMIENTO MÍNIMO (mm)									
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc
$25 \leq f_{ck} < 40$	General	20	25	30	35	35	40	35	40	(*)	(*)
	Elementos prefabricados y láminas	15	20	25	30	30	35	30	35	(*)	(*)
$f_{ck} \geq 40$	General	15	20	25	30	30	35	30	35	(*)	(*)
	Elementos prefabricados y láminas	15	20	25	25	25	30	25	30	(*)	(*)

(*) El proyectista fijará el espesor del recubrimiento al objeto de que se garantice adecuadamente la protección de las armaduras frente a la acción agresiva ambiental.

Con respecto al curado y por la repercusión que tiene en la durabilidad del hormigón al cerrar poros, la Instrucción EHE es bastante exigente como consecuencia de las altas clases resistentes de los cementos utilizados y del contenido de adiciones (cenizas volantes o humo de sílice) que incorporan algunos hormigones, y por supuesto a las condiciones ambientales existente en nuestro país durante la época de verano donde las temperaturas llegan a alcanzar valores cercanos a los 40°C en algunas zonas, con humedades relativas que, a veces, llegan al 28%, especialmente en el centro de España y en el mes de Julio.

La Instrucción ha sustituido lo indicado en su versión anterior de 1991 en la que decía que: *"el curado hay que prolongarlo desde el momento de la puesta en obra hasta que el hormigón alcance una resistencia del 70% de la de proyecto"*, por: *"el curado hay que realizarlo durante el tiempo suficiente"*. Este tiempo se fija por medio de una fórmula en la que se tienen en consideración: la clase de exposición ambiental del hormigón, la temperatura ambiente, la velocidad de desarrollo de resistencias del hormigón, el tipo de cemento utilizado, el soleamiento, etc.

La fórmula de curado es la siguiente:

$$D = K.L.D_0 + D_1$$

siendo en esta ecuación:

- D duración mínima de curado, en días.
- K coeficiente de ponderación ambiental que depende de la clase de exposición en la que este el hormigón.
- L coeficiente de ponderación térmica que depende de la temperatura media durante el curado.
- D_0 parámetro básico de curado que depende de la velocidad de desarrollo de resistencias del hormigón, exposición al sol, viento y humedad relativa.
- D_1 parámetro dependiente del tipo de cemento utilizado y, en su caso, también del contenido de adición de que lleve el hormigón.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros nos encontramos que puede haber tiempos de curado que de acuerdo con las condiciones extremas de nuestro país, pueden oscilar entre 0,5 y 15 días.

Conclusiones.

Las conclusiones a las que llegamos después de estas reflexiones se pueden resumir en las siguientes:

Todos los códigos e instrucciones son buenos, unos aportan algunos aspectos positivos adicionales sobre otros, que pueden ser muy interesantes desde el punto de vista de cálculo y de durabilidad, como ocurre con la Instrucción EHE española.

Los códigos tienen que estar vivos, de aquí que existan comisiones permanentes encargadas de trabajar constantemente en su perfeccionamiento y puesta al día de acuerdo con los nuevos materiales que van surgiendo y las nuevas exigencias que se le van haciendo al hormigón armado y pretensado.

Estas comisiones tienen que ir introduciendo las modificaciones que, de acuerdo con el mayor conocimiento de funcionamiento del hormigón vayan surgiendo, de los métodos de cálculo más avanzados que aparezcan, los nuevos sistemas constructivos y la experiencia que se vaya obteniendo.

Como conclusión final habría que decir que **los códigos están hechos para cumplirlos en su totalidad, aplicarlos y no saltárselos. Si no se hace así hay que justificar técnicamente la solución alternativa que se aplica y responsabilizarse de ella.**