

Principales novedades de la española de Hormigón Estructural

1ª parte

Por **Alfonso Vázquez García**
INGENIERO DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS.

Este artículo tiene por objeto dar a conocer al técnico relacionado con el mundo de la carretera los aspectos más novedosos que contiene la nueva Instrucción de hormigón estructural EHE con relación a las Instrucciones EH-91 y EP-93 a las que sustituye. En ningún momento se ha querido abordar con detalle y profundidad todos los cambios producidos, sino que se ha tratado de dar una visión general de éstos, haciendo hincapié en los que puedan tener un mayor interés para las direcciones de obra.

Dada la extensión del artículo, se va a publicar en dos partes. En la primera se desarrolla la parte relativa al cálculo, en la que se abordarán los temas de bases de proyecto, análisis estructural y estados límites, mientras que en la segunda se describen las novedades producidas en los materiales, la ejecución y el control.



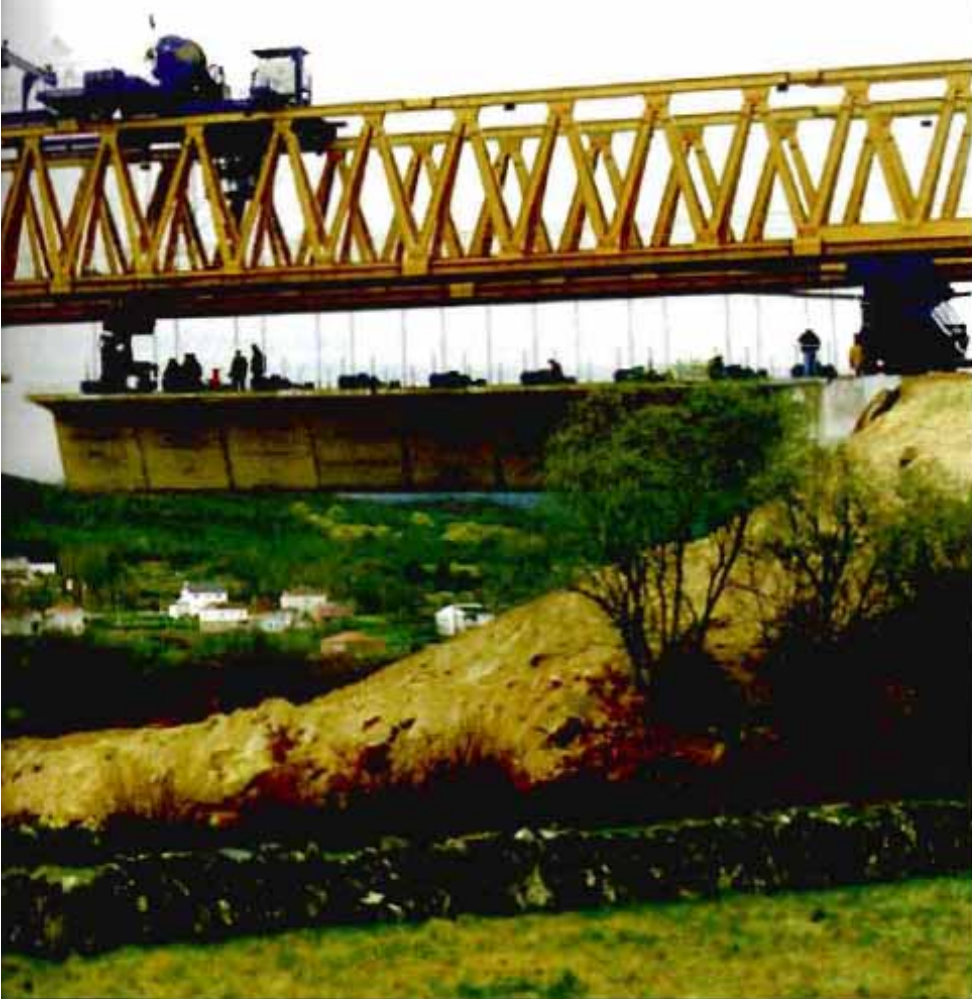
1. Antecedentes

La nueva Instrucción EHE es la última de una serie de Instrucciones sobre estructuras de hormigón iniciada en el año 1939, para el caso de obras de hormigón en masa o armado, y en el año 1977 para el hormigón pretensado. Estos 60 años de historia se pueden dividir en tres grandes etapas: la primera, de 1939 a 1973, en

la que se primaba ante todo la resistencia mecánica del hormigón; una segunda etapa, entre 1973 y 1999, en la que, superada esta primera exigencia, se pone una especial atención en la mejora de la calidad de los materiales y de las estructuras; y finalmente una tercera etapa, que abre la nueva Instrucción EHE, en la que se establecen los pilares necesarios para mejorar la durabilidad de las realizaciones con hormigón.

El embrión de la Instrucción

Instrucción EHE



**La nueva Instrucción
EHE establece
los pilares necesarios
para mejorar
la durabilidad
de las realizaciones
con hormigón**

EHE comenzó a gestarse a partir de un documento publicado por la Comisión Permanente del Hormigón en el año 1994, titulado "Propuestas para mejorar la calidad del hormigón", y en el que se ponía de manifiesto que los hormigones H-175, tradicionalmente utilizados en edificación, cumplían las exigencias de resistencia mecánica; pero presentaban una escasa durabilidad ante el ataque de los agentes agresivos exteriores, como consecuencia de que po-

dían fabricarse con menores contenidos de cemento y mayores relaciones agua/cemento que los reglamentariamente exigidos.

Comenzada la revisión de la Instrucción EH-91, desde el punto de vista de la durabilidad de las estructuras de hormigón, se consideró que sería conveniente realizar un tratamiento conjunto de todas las obras de hormigón, tanto en masa como armadas o pretensadas, y darles un enfoque más útil para el técnico, reordenando conceptos y mejorando el contenido de las Instrucciones vigentes en aquel momento EH-91 y EP-93.

A partir de entonces, las ideas rectoras fueron las siguientes:

1.- Abordar en su conjunto el hormigón estructural: hormigón en masa, armado y pretensado, este último tanto con armaduras pretesas como postesas (adherentes o no adherentes).

2.- Considerar las estructuras en general, es decir, tanto de edificación como de obra civil.

3.- Aprovechar todo lo más posible la tradición de las Instrucciones anteriores.

4.- Tener en cuenta la interacción con la normativa existente sobre materiales, y la reglamentación sobre definición de acciones y bases de proyecto (IAP-95, IAPF-96, EA-88).

5.- Tratar de armonizar el contenido de la nueva Instrucción con los Eurocódigos, especialmente en el caso del EC1 en las bases de proyecto, del EC2 en las partes relativas a reglas generales y reglas para edificación, y en el tema concreto de puentes.

6.- Adoptar el Sistema Internacional de medidas.

El trabajo de elaboración corrió a cargo de un grupo de trabajo de la Comisión Permanente del Hormigón, que contó con la colaboración de más de 200 técnicos y especialistas pertenecientes a la Administración, Universidad, Centros de Inves-

tigación, Colegios Profesionales, Projectistas, Fabricantes de Materiales, Laboratorios de Control y Constructores, y cuyas principales novedades se van a destacar a continuación.

2. Entrada en vigor

Antes de comenzar a comentar el contenido, debe hacerse un breve comentario sobre la entrada en vigor de la nueva Instrucción EHE.

En el Real Decreto 2661/1998, de 11 de diciembre, por el que se aprobaba la Instrucción EHE, se establecía, con carácter obligatorio, su entrada en vigor el día 1 de julio de 1999. Sin embargo, unos meses más tarde el Real Decreto 996/1999, de 11 de junio, pospuso su entrada en vigor para el caso de:

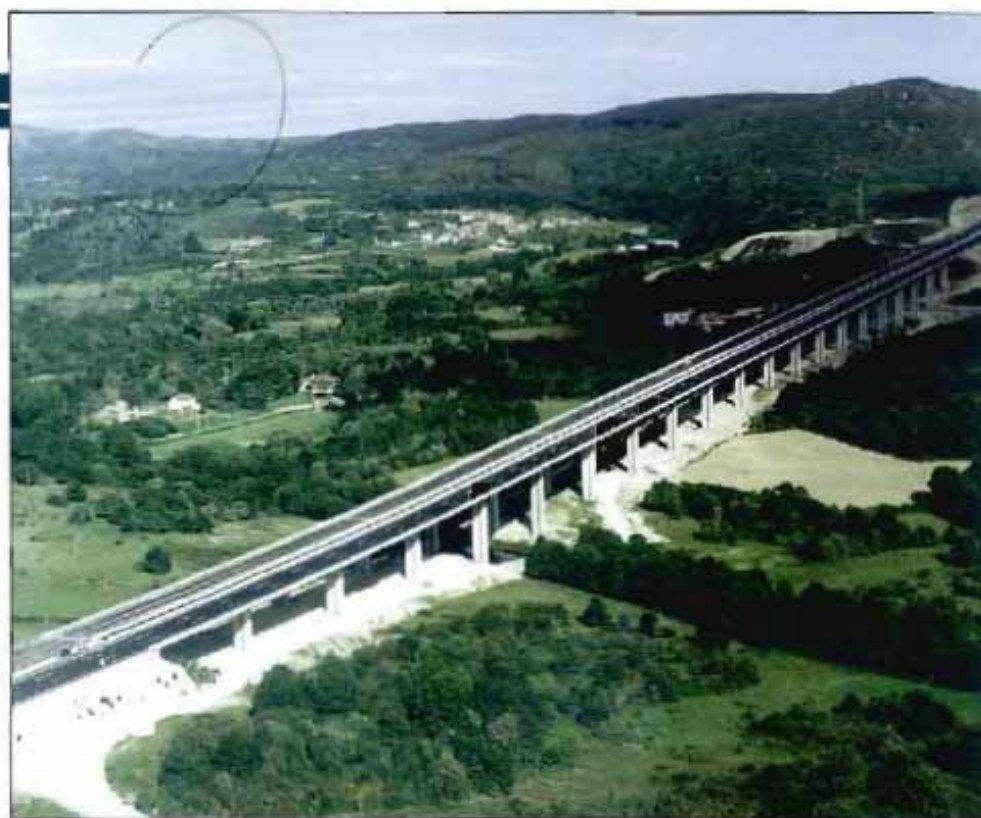
- proyectos ya aprobados, o en fase de aprobación, por parte de las Administraciones públicas;

- proyectos visados, o en fase de visado, por parte de Colegios Profesionales;

- proyectos en fase de redacción;

todos ellos antes del 1 de julio de 1999, así como para las obras que se desarrollen para su ejecución. En todos estos casos, existe la posibilidad de que las partes contratantes acuerden regirse por la nueva Instrucción EHE, en lugar de por la previamente existente.

La razón de esta modificación era la imposibilidad de adaptar a tiempo el gran número de proyectos en marcha por parte de la Administración Central, fundamentalmente del Ministerio de Fomento, lo que conllevaría un inevitable y largo retraso en la realización de una serie de importantes infraestructuras (sobre todo, las obras de autovía en el norte de España, en las que existe una considerable cantidad de viaductos, puentes y obras de fábrica).



Por primera vez se incluye el concepto de vida útil de la estructura, desarrollándose y definiéndose con mayor detalle los elementos básicos para garantizar una durabilidad adecuada.

Esta modificación, lógica en sus planteamientos, no debe utilizarse como vía para demorar la aplicación de la nueva reglamentación ante el temor de algunos projectistas y Directores de obra a tener que abordar un "campo nuevo".

En este sentido es justo indicar a estos técnicos que, desde el punto de vista del cálculo, la adaptación del proyecto es muy sencilla, y que no se producirán cambios sustanciales; que, desde el punto de vista de la Dirección facultativa, la nueva reglamentación deja correctamente establecida la responsabilidad de cada uno de los agentes implicados en la construcción; y que, desde el punto de vista del coste (sobre todo en el campo de la edificación), el paso de la utilización de un H-175 a un H-250 no debe, en principio, suponer un incremento de coste apreciable en el conjunto de la obra.

Por el contrario, la aplicación de la nueva Instrucción EHE va a permitir mejorar la calidad de las estructuras, su durabilidad y, lo que también es importante, el número de posi-

bles reclamaciones por datos durante el periodo de garantía decenal.

Por todo ello, desde el punto de vista del autor de este artículo, merece la pena adoptar ya desde el principio la nueva reglamentación y no tratar de ir compaginándola o adaptándola a los planteamientos de la anterior.

3. Estructura de la nueva instrucción

La Instrucción EHE se divide en cinco partes claramente diferenciadas:

- bases de proyecto y análisis estructural;
- propiedades tecnológicas de los materiales;
- cálculo de secciones y elementos estructurales;
- ejecución y control; y
- anejos.

El campo de aplicación de la Instrucción se extiende al de todas las estructuras y elementos estructurales realizados con hormigón en masa, armado o pretensado, contemplándose para este último únicamente los

casos en que las armaduras activas se encuentren dentro del canto del elemento (quedan, pues, excluidos determinados casos de pretensado exterior).

Para obras especiales serán de aplicación las reglamentaciones específicas al respecto, y para el caso de los forjados se deberán seguir las indicaciones de la Instrucción para el proyecto y ejecución de forjados unidireccionales vigente en cada momento (en la actualidad es la EF-96).

Existen una serie de estructuras o aplicaciones que quedan expresamente excluidas del ámbito de la Instrucción, como son: las presas, las estructuras realizadas con hormigones especiales (hormigones ligeros, pesados, refractarios, con amiantos, serrines, etc.), las estructuras que normalmente estén expuestas a temperaturas superiores a 70°C, así como las estructuras mixtas.

4. Novedades más relevantes desde el punto de vista del cálculo

La nueva Instrucción no introduce grandes novedades o procedimientos revolucionarios. Su gran contribución es dar un tratamiento más lógico a todos los temas, que se agrupan para facilitar la labor al proyectista.

Como es lógico, este reglamento no puede descender al detalle y convertirse en un recetario con el que se resuelvan los casos que puedan presentarse, limitándose a orientar al proyectista sobre los procedimientos de cálculo que debe seguir, si bien en ocasiones se le facilitan valiosas herramientas de cálculo o métodos simplificados. Y todo ello, porque se parte de un principio básico fijado en el artículo 1°:

"Esta Instrucción supone que el proyecto, construcción y control de las estructuras que constituyen su campo de aplicación serán llevados a cabo por técnicos y operarios con los conocimientos necesarios y la experiencia suficiente."

4.1 Bases de proyecto y análisis estructural

4.1.1 Requisitos esenciales y bases de cálculo

Los requisitos esenciales que debe cumplir una estructura se recogen en el artículo 5°, en el que se introduce un concepto novedoso: la vida útil de la estructura, concepto directamente relacionado con la durabilidad, eje central alrededor del cual se ha estructurado toda la Instrucción.

Las bases de cálculo siguen apoyándose en el sistema de los Estados Límite, pudiéndose

Tabla 1: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras

Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	Descripción	Ejemplos
No agresiva		I	Ninguno	• Interiores de edificios no sometidos a condensaciones. • Elementos de hormigón en masa	• Interiores de edificios protegidos de la intemperie.
Normal	Humedad alta	Ila	Corrosión de origen diferente de los cloruros	• Interiores sometidos a humedades relativas altas (>65%) o a condensaciones. • Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. • Elementos enterrados o sumergidos.	• Sótanos no ventilados. • Cimentaciones. • Tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. • Elementos de hormigón en cubiertas de edificios.
	Humedad media	Ilb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	• Exteriores, en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm.	• Construcciones exteriores protegidas de la lluvia. • Tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm.
Marina	Aérea	Illa	Corrosión por cloruros	• Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar. • Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km).	• Edificaciones y puentes en las proximidades de la costa. • Instalaciones portuarias. • Zonas aéreas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral.
	Sumergida	IIlb	Corrosión por cloruros	• Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente por debajo del nivel mínimo de bajamar.	• Zonas sumergidas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral. • Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.
	En zona de mareas	IIlc	Corrosión por cloruros	• Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas.	• Zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral. • Zonas de pilas de puentes sobre el mar situadas en el recorrido de marea.
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	Corrosión por cloruros	• Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros no relacionados con el ambiente marino. • Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	• Piscinas. • Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve. • Estaciones de tratamiento de agua.

realizar su comprobación por dos vías:

- mediante procedimientos de cálculo (método de los coeficientes parciales de seguridad); o

- mediante ensayos, situación reservada para casos especiales en los que las reglas contenidas en la EHE no sean suficientes, o cuando la realización de estos ensayos pueda conducir a economías significativas.

Dentro de los Estados Límite Últimos se distinguen los de agotamiento, inestabilidad, equilibrio y fatiga, y entre los Estados Límite de Servicio los de deformaciones, vibraciones y fisuración.

Se incluyen dentro de las bases de cálculo las orientadas a la durabilidad (Art. 8.2), indicándose que antes de comenzar



La Instrucción incorpora nuevos Estados Límite: el de agotamiento por esfuerzo resistente, fatiga y vibraciones.

Tabla 2: Clases específicas de exposición relativas a otros procesos de deterioro distintos de la corrosión de las armaduras

Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	Descripción	Ejemplos
Química agresiva	Débil	Qa	Ataque químico	• Elementos situados en ambiente con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta ⁽¹⁾ .	• Interiores de edificios protegidos de la intemperie. • Instalaciones industriales con sustancias débilmente agresivas ⁽¹⁾ . • Construcciones en proximidades de áreas industriales con agresividad débil ⁽¹⁾ .
	Media	Qb	Ataque químico	• Elementos en contacto con agua de mar. • Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media ⁽¹⁾ .	• Dolos, bloques y otros elementos para diques. • Estructuras marinas en general. • Instalaciones industriales con sustancias de agresividad media ⁽¹⁾ . • Construcciones en proximidades de áreas industriales con agresividad media ⁽¹⁾ . • Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media ⁽¹⁾ .
	Fuerte	Qc	Ataque químico	• Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida ⁽¹⁾ .	• Instalaciones industriales con sustancias de agresividad alta ⁽¹⁾ . • Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad alta ⁽¹⁾ .
Con heladas	Sin fundentes	H	Ataque hielo-deshielo	• Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 5% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C.	• Construcciones en zonas de alta montaña. • Estaciones invernales.
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes	• Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C.	• Tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña.
Erosión		E	Abrasión Cavitación	• Elementos sometidos a desgaste superficial. • Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica puede descender por debajo de la presión de vapor de agua.	• Pilas de puentes en cauces muy torrenciales. • Elementos de diques, pantanos y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes. • Pavimentos de hormigón. • Tuberías de alta presión.

(1) La descripción del grado de agresividad química de suelos y aguas está recogida en la tabla 8.2.3.1 de la Instrucción EHE.

el proyecto, debe identificarse el tipo de ambiente en el que se encuentra cada elemento estructural, a fin de conocer las agresiones físicas y/o químicas a las que va a verse sometido.

La clasificación de ambientes es absolutamente novedosa, distinguiéndose entre clases generales de exposición (tabla 1), relativas a los procesos que provocan la corrosión de las armaduras (carbonatación y cloruros), y clases específicas de exposición (tabla 2), en las que se produce un ataque al hormigón propiamente dicho (ataque químico, por heladas y erosión).

4.1.2. Acciones, materiales y geometría

El artículo 9 realiza una clasificación de las acciones en función de su:

- **Naturaleza:** acciones directas (peso propio, cargas permanentes, sobrecargas de uso, etc.) e indirectas (temperaturas, asientos en cimentaciones, acciones reológicas, acciones sísmicas, etc.).

- **Variación en el tiempo:** acciones permanentes (peso propio), acciones permanentes de valor no constante (pretensado), acciones variables (sobrecargas de uso) y acciones accidentales.

- **Variación en el espacio:** acciones fijas y libres.

Además de los conceptos de valor característico y valor de cálculo de una acción, se introduce el de valor representativo de una acción, utilizado en la comprobación de los Estados Límites. Éste se define como el

valor característico de la acción multiplicado por un coeficiente ψ , que tiene en cuenta el tiempo durante el que actúa esa acción, su frecuencia y su combinación con otras posibles acciones, y que viene fijado por la correspondiente Norma o Instrucción de acciones vigente.

En cuanto a los coeficientes parciales de seguridad para la comprobación de los Estados Límites Últimos, éstos siguen dependiendo del nivel de control de ejecución, pudiendo llegar a ser de tan sólo 1,35 para acciones permanentes y nivel de ejecución intenso (ver tabla 3).

Los coeficientes de minoración de resistencia de los materiales siguen siendo 1,5 para el hormigón y 1,15 para el acero, sin que se contemplen reducciones en función del nivel de control.

4.2 Análisis estructural

La Instrucción EHE ha incorporado un nuevo capítulo dedicado al análisis estructural, donde se fijan sus principios básicos:

- Idealización de la estructura (geometría, acciones, condiciones de apoyo) mediante modelo matemático adecuado.

- Métodos de cálculo adecuados para realizar el análisis de la estructura de forma global, en el que habrá que comprobar las condiciones de equilibrio y de compatibilidad, teniendo en

cuenta el comportamiento tenso-deformacional de los materiales. Los tipos de análisis que se contemplan son:

- **Análisis lineal**, basado en la hipótesis de un comportamiento elástico-lineal de los materiales, y en la consideración del equilibrio en la estructura sin deformar.

- **Análisis no lineal**, en el que ni los materiales ni la estructura presentan un comportamiento lineal, por lo que la respuesta de la estructura depende de la historia de cargas, debiéndose realizar un proceso iterativo de cálculo.

- **Análisis lineal con redistribución limitada**, válido únicamente en las estructuras dotadas de las condiciones de ductilidad adecuadas.

- **Análisis plástico**, en el que se considera el comportamiento plástico, elasto-plástico o rígido-plástico de los materiales, así como que se cumple uno de los teoremas básicos de la plasticidad (límite inferior, límite superior o unicidad). Este procedimiento únicamente es válido si existe ductilidad suficiente, y no puede utilizarse si han de considerarse efectos de segundo orden.

En este capítulo se indica además cómo ha de realizarse el análisis estructural del pretensado, definiendo la fuerza de pretensado, las pérdidas en

Tabla 4: Coeficientes parciales de seguridad de los materiales para Estados Límites Últimos, salvo el E.L.U. de fatiga

Situación de proyecto	Hormigón γ_c	Acero pasivo y activo γ_s
Persistente o transitoria	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,0

Tabla 3: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones, aplicables para la evaluación de los Estados Límites Últimos

Tipo de Acción	Situación persistente o transitoria		Situación accidental		Nivel de control de ejecución		
	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Efecto favorable	Efecto desfavorable	Intenso	Normal	Reducido
Permanente γ_p	1,00	1,35	1,00	1,00	1,35	1,50	1,60
Pretensado γ_p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	—
Permanente de valor no constante γ_p^*	1,00	1,50	1,00	1,00	1,50	1,60	1,80
Variable γ_v	0	1,50	0	1,00	1,50	1,60	1,80
Accidental γ_a	—	—	1,00	1,00	—	—	—

piezas con armaduras postesas (instantáneas, rozamiento, penetración de cuñas, acortamiento elástico del hormigón y diferidas) y pretesas, y la forma de modelizar los efectos del pretensado (fuerzas equivalentes, deformaciones impuestas y esfuerzos isostáticos o hiperestáticos).

A continuación, y de una forma más completa y didáctica que en la EH-91, se analizan los casos de estructuras reticulares planas, placas, membranas y láminas. Como novedad más destacada, la Instrucción aborda el tratamiento de las regiones D^(*), regiones de discontinuidad que aparecen en las estructuras o en algunas de sus partes, caracterizándose por el hecho de que en ellas no es válida la teoría general de flexión, es decir, que no son de aplicación las hipótesis de Bernoulli-Navier o Kirchhoff (figura 1).

Por último, se describe con detalle el análisis del comportamiento diferido de una estructura: fluencia, retracción, envejecimiento del hormigón y relajación del acero de pretensado.

4.3. Datos de los materiales para el proyecto

4.3.1. Aceros

Entre los aspectos más novedosos destacables para el proyectista pueden señalarse los siguientes:

1.- Desaparece el acero liso.

2.- Las barras corrugadas son todas soldables, distinguiéndose dos límites elásticos 400 y 500 N/mm². Además, se contempla un nuevo acero de alta ductilidad, el B 400 SD, especialmente indicado para armar las estructuras en zonas sísmicas o cuando se quieran realizar redistribuciones limitadas.

3.- Se incorpora de nuevo el diámetro de 14 mm.

4.- El empleo de mallas electrosoldadas con alambres de diámetro inferior a 5 mm sólo se admite para el control de la fisuración superficial, no pudiéndose considerar a efectos de Estados Límite Últimos.

5.- En cuanto al diagrama característico tensión-deformación del acero para armaduras pasivas, y a falta de datos experimentales más precisos, se acepta un diagrama bilineal con un ligero endurecimiento ($f_{lim} > f_u$) después de la plastificación. Posteriormente, en el diagrama de cálculo, se admite que se considere o no el citado endurecimiento.

6.- Como ya se ha comentado, el coeficiente de minoración del acero ($\gamma_s = 1,15$) no depende del nivel de control adoptado. Sin embargo, en el caso de que el nivel de control sea reducido, la resistencia de cálculo del acero debe minorarse adicionalmente en un 25%:

$$f_{sd} = \frac{0,75 f_{sk}}{\gamma_s}$$

7.- Se ha adoptado la for-

mulación del Código Modelo del 90 para el cálculo de la relajación del acero en armaduras activas.

8.- Se incorpora un artículo nuevo con las características de los aceros ante la fatiga, para poder realizar la comprobación de este E.L.U.

9.- En el caso de las armaduras activas, se introduce en comentarios (artículo 67.4) un procedimiento simplificado para la estimación de las longitudes de transmisión y de anclaje por adherencia.

4.3.2. Hormigones

1.- Se tipifican las siguientes resistencias características a compresión: 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 N/mm² (artículo 39.2). Para hormigones de resistencias comprendidas entre 50 y 100 N/mm² deben seguirse las recomendaciones recogidas en el Anejo 11.

2.- La resistencia característica mínima para hormigones de masa es de 20 N/mm², y de 25 N/mm² para hormigones armados y pretensados.

3.- Todos los hormigones deben cumplir, además, los requisitos de durabilidad establecidos en el artículo 37.3.1 (contenido mínimo de cemento y máxima relación a/c) en función del tipo de ambiente al que se encuentre expuesto.

4.- Como en Instrucciones anteriores, se proponen varios diagramas constitutivos sin formulación analítica, o bien la utilización del diagrama parábola-rectángulo (definido en el artículo 39.5) modificado para valores característicos.

5.- La resistencia de cálculo del hormigón deja de minorar-

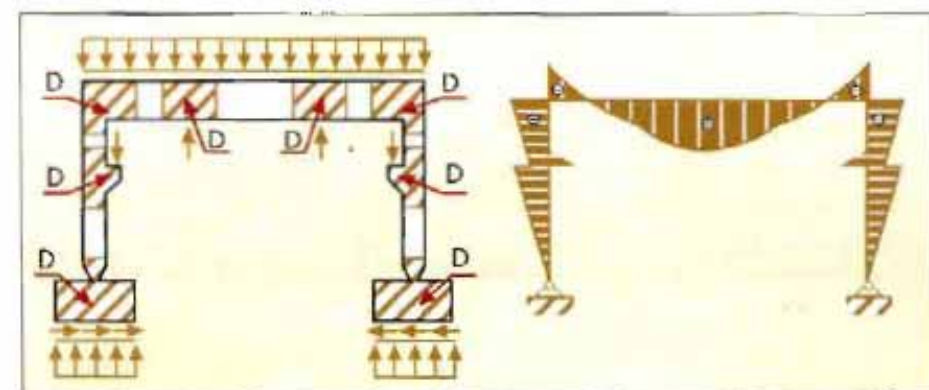


Figura 1- Regiones D de discontinuidad

(*) Estas regiones D aparecen con cierta frecuencia en las estructuras; por ejemplo, cuando se producen cambios bruscos de geometría, en zonas de aplicación de cargas concentradas y reacciones, o bien cuando hay dimensiones desproporcionadas, como es el caso de vigas de gran canto o ménsulas cortas.

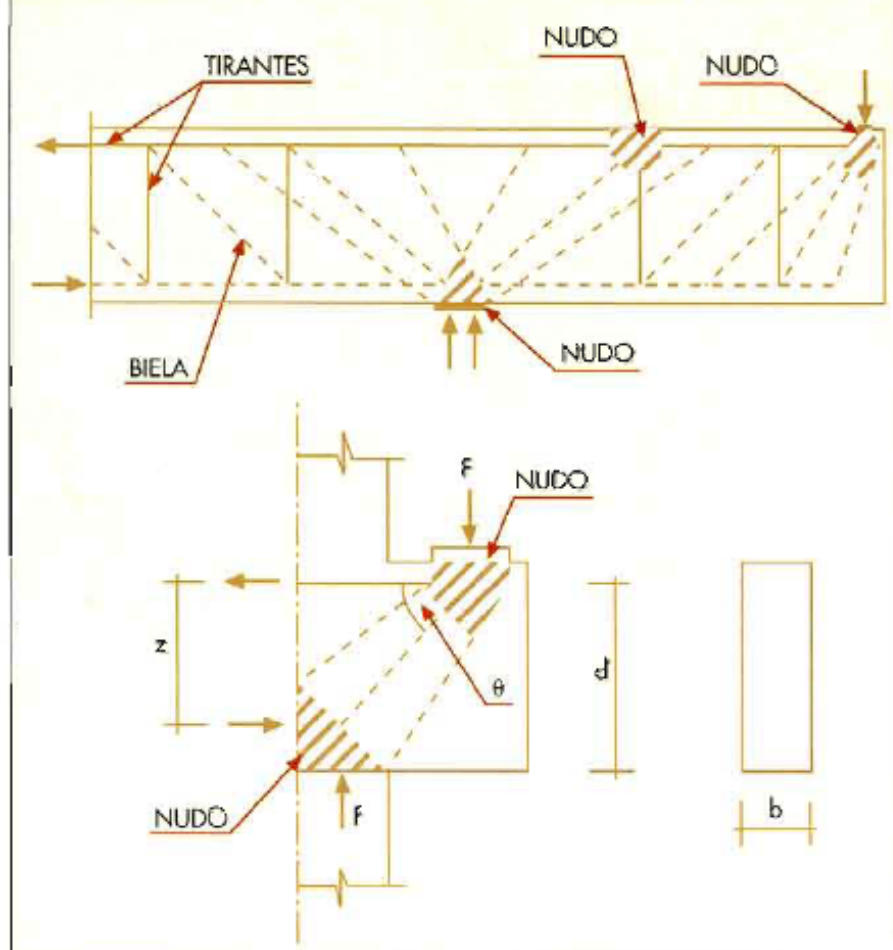


Figura 2: Ejemplo del método de bielas y tirantes para una viga y una ménsula corta.

se en un 10% por hormigonado vertical. Asimismo, en el caso de adoptar un nivel de control reducido para el hormigón, no podrá considerarse una resistencia de cálculo superior a 10 N/mm^2 .

6.- El método simplificado de cálculo de secciones a agotamiento, o momento tope, queda sustituido por el método del diagrama rectangular de la parte de hormigón comprimida (artículo 39.5 y Anejo 8).

7.- El cálculo del módulo de deformación longitudinal del hormigón se hace a partir de la resistencia media a compresión en lugar de la resistencia característica. Además, las expresiones propuestas son válidas para valores de tensión inferiores a $0.45 f_{td}$ (antes 0.50). Por otra parte, en los comentarios se proponen unos coeficientes de corrección para los valores del módulo de deformación en función de la naturaleza del árido y de la edad del hormigón.

8.- Los métodos de evalua-

ción de la retracción y fluencia del hormigón han sido notablemente modificados, sustituyéndose los gráficos de la anterior Instrucción EH-91 por su formulación analítica.

4.3.3. Capacidad resistente de bielas y tirantes

Se incorpora un nuevo articulado (artículo 40) en el que se desarrollan los conceptos fundamentales necesarios para el análisis de elementos estructurales mediante la analogía de bielas (elementos comprimidos) y tirantes (elementos traccionados), herramienta básica para el estudio de las regiones D y de Estados Límite Últimos (ver fig. 2).

4.4. Cálculos relativos a los Estados Límite

4.4.1. Estados Límite Últimos

4.4.1.1. Estado límite de equilibrio

La Instrucción se limita a indicar que, bajo la hipótesis de carga más desfavorable, debe

comprobarse que no se sobrepasan los límites de equilibrio (vuelco, deslizamiento, etc.) aplicando los métodos de la Mecánica Racional y teniendo en cuenta las condiciones reales de la sustentación.

4.4.1.2. Estado límite de agotamiento

Contempla los casos de sollicitaciones normales, cortante, torsión, rasante, punzonamiento e inestabilidad.

Como novedades más destacables cabe mencionar las siguientes:

1.- En el caso del **E.L.U. frente a sollicitaciones normales** se ha incrementado el valor de la resistencia que puede considerarse para el hormigón confinado en zonas comprimidas, y que se desarrolla en el artículo 40.3.4, y se han aumentado también las cuantías geométricas mínimas (artículo 42.3.5) para el caso de losas y muros.

2.- En el **E.L.U. de agotamiento ante cortante** se sigue utilizando el método de bielas y tirantes (regla de cosido), y se ha desarrollado una formulación específica al introducirse el efecto de la fuerza de pretensado. Como novedad, el proyectista puede fijar el ángulo de las bielas de compresión entre los siguientes valores extremos $0.5 \leq \cotg \theta \leq 2.0$.

3.- En el **E.L.U. de agotamiento por torsión en elementos lineales** se ha dado un tratamiento más extenso, variando la formulación general en algunos apartados, como, por ejemplo, en las comprobaciones a realizar o en la obtención de los momentos torsores. Asimismo, se analiza con más detalle la combinación de la torsión con otros esfuerzos, incluyéndose un método simplificado para el cálculo de la torsión combinada con flexión y axil, y para la torsión combinada con cortante.

4.- Por primera vez aparece en la Instrucción un **E.L.U. de agotamiento por esfuerzo rasante**. La comprobación de este E.L. debe realizarse para el rasante ala-alma que aparece en las cabezas de vigas en T, en I, en cajón, etc., así como en las juntas que se producen entre hormigones. En el primer caso, las expresiones resultantes se obtienen al emplear el método de bielas y tirantes particularizado para el caso de bielas inclinadas un ángulo $\theta = 45^\circ$ y armadura perpendicular ($\alpha = 90^\circ$). En el segundo caso, se analiza el efecto cortante-fricción que se produce en la junta, por lo que se hacen intervenir los esfuerzos originados por efecto de adhesión, la resistencia de la armadura y el rozamiento.

5.- El **punzonamiento** recibe un tratamiento más particularizado que en las Instrucciones anteriores, constituyendo en sí mismo un E.L.U. El aspecto más destacable es la sencillez con la que se aborda su cálculo, en especial en lo que se refiere a pilares de borde o de esquina.

El perímetro crítico pasa a estar a $2d$ (siendo "d" el canto útil de la losa) desde el perímetro del área cargada o del soporte, en lugar de a $0,5d$ como hasta ahora indicaba la EH-91, adoptándose además el criterio de redondear las esquinas del área crítica (figura 3). Asimismo, es novedosa la introducción de una comprobación adicional de la máxima resistencia a punzonamiento que puede alcanzarse (artículo 46.4).

6.- Por último, el **E.L. de inestabilidad** recibe el mismo tratamiento que en las Instrucciones EH-91 y EP-93, habiéndose incorporado dos métodos aproximados de comprobación para la flexión compuesta recta y esviada.

4.4.1.3. Estado límite de fatiga

Se incluye la fatiga como

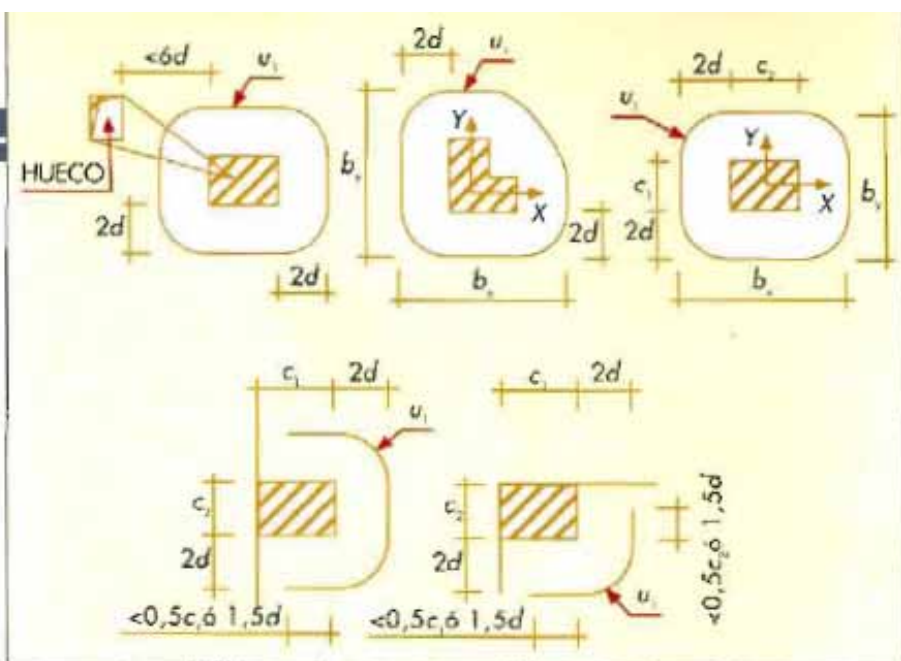


Figura 3: Perímetro crítico de punzonamiento en soportes interiores, de borde y de esquina.

nuevo Estado Límite en el articulado, indicándose que su comprobación puede ser necesaria en estructuras sometidas a acciones variables repetidas significativas (por ejemplo en puentes de ferrocarril), pero que en estructuras "normales", por lo general, no es necesario.

La comprobación de este E.L. se realiza de forma independiente para el acero y el hormigón, adoptándose un coeficiente de mayoración de acciones $\gamma = 1$.

4.4.2. Estados límite de servicio

4.4.2.1. Estado límite de fisuración

No hay conceptos nuevos que resaltar en este E.L., salvo que se han introducido, con relación a la EH-91, dos nuevas limitaciones de la fisuración por esfuerzo cortante y por torsión, así como un nuevo nivel en los valores de abertura máxima de fisura ($w \leq 0,3 \text{ mm}$) como consecuencia del incremento del tipo de ambientes considerados.

4.4.2.2. Estado límite de deformación

En este E.L. se comprueba que los movimientos de la estructura (giros y flechas) o del elemento estructural no superan unos valores límites máximos.

En relación al cálculo de la flecha, se ha incorporado una tabla de cantos mínimos (artículo 50.2.2.1) que ahorra su comprobación en las situaciones normales de uso en edificación. Esta tabla ha sido preparada considerando el caso más desfavorable desde el punto de vista de la deformación, que se corresponde al caso de elementos armados con acero $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$. Lógicamente, y aunque no se indica expresamente en el articulado, los mencionados valores son también de aplicación a los casos en los que se utilice acero $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$.

4.4.2.3. Estado límite de vibraciones

La Instrucción EHE incorpora este nuevo E.L. en el que se controlan las vibraciones que puede experimentar una estructura por razones funcionales (comodidad del usuario, funcionamiento de máquinas o equipos) y estructurales (colapso de la estructura por efectos de resonancia o fatiga). La estructura debe proyectarse de manera que su frecuencia natural de vibración se aparte suficientemente de unos valores críticos recogidos en el artículo 51.2 (tabla 5).

4.5. Elementos estructurales

Los cambios que se han pro-

Tabla 5: Frecuencias naturales de vibración de determinadas estructuras

Estructura	Frecuencia (Hz)
Gimnasios o palacios de deporte	>8
Salas de fiestas o conciertos sin asientos fijos	>7
Salas de fiestas o conciertos con asientos fijos	> 3,4

ducido en esta parte de la Instrucción se resumen a continuación:

1.- En placas o losas de hormigón armado sobre apoyos aislados se incrementa el espesor mínimo de la capa de compresión de 3 a 5 cm, con la exigencia de que se utilice una armadura de reparto en malla.

2.- Se incorpora un nuevo artículo relativo a muros (artículo 57).

3.- En el tema de las cimentaciones, éstas quedan clasificadas en rígidas y flexibles, aplicándose el método de bielas y tirantes para las primeras, y la teoría de la flexión para las segundas. Se incorporan nuevos artículos relativos a pilotes (59.6), vigas de centrado y atado (59.5) y losas de cimentación (59.4.2.2).

4.- Se analizan por el método de bielas y tirantes las regiones D que aparecen en los casos de: cargas concentradas sobre macizos, zonas de anclaje, vigas de gran canto, ménsulas cortas y elementos con empuje al vacío.

4.6. Otras novedades

Además de las novedades relativas al cálculo propiamente dicho, se han producido otro tipo de novedades relativas a las disposiciones de las armaduras, designación de los hormigones, tolerancias, etc., que también deben tenerse en cuenta en el proyecto y que se resumen a continuación.

4.6.1. Documentación

En relación a la documentación que ha de formar parte del proyecto de la estructura, se han producido las siguientes novedades:

1.- Obligatoriedad de que todo proyecto cuente con un estudio geotécnico del terreno sobre el que se ejecutará la obra.

2.- De forma explícita se indica que en el PPTP deben establecerse –expresamente o por referencia a Normas, Instrucciones o Reglamentos– las características de los materiales y de las distintas unidades de obra, las modalidades de control tanto para materiales como para la ejecución, así como las tolerancias dimensionales de los elementos acabados. Asimismo, deberán detallarse los sistemas de medición y valoración de las unidades de obra, así como las obligaciones de orden técnico que correspondan al contratista.

3.- El proyecto debe contener las referencias necesarias para el replanteo correcto de la obra.

4.- En el caso de los planos, éstos deben incluir obligatoriamente:

- un cuadro con la tipificación de los hormigones, de acuerdo a lo indicado en el artículo 39.2 y, en su caso, las propiedades especificadas para ellos;

- las características resistentes de los aceros empleados en los elementos que define el plano;

- el tipo de control previsto;
- los coeficientes de seguridad adoptados en el cálculo;

- el programa de tesado (de acuerdo con 67.8.2), en el caso de obras de hormigón pretensado.

4.6.2. Materiales

1.- La Instrucción EHE ha incorporado un anejo de recomendaciones de uso de los ce-

mentos (Anejo 3) totalmente novedoso con relación al que contenían las Instrucciones anteriores, facilitando así la elección del cemento más idóneo en función del tipo de aplicación, circunstancias que rodeen la obra y tipo de ambiente agresivo.

2.- Los hormigones se tipifican según una "matrícula" que debe figurar en los Planos y en el Pliego de Prescripciones del proyecto (artículo 39.2). Dicha matrícula contiene información sobre el uso del hormigón (en masa, armado o pretensado), resistencia característica especificada (en N/mm²), consistencia, tamaño máximo del árido y designación del tipo de ambiente.

3.- En el caso de hormigones para edificación, se recomienda que en general el asiento en el cono de Abrams no sea inferior a 6 cm (artículo 30.6).

4.6.3. Disposición de las armaduras

1.- Se exige la disposición de separadores para garantizar los recubrimientos (art.37.2.5).

2.- Los valores de los recubrimientos mínimos experimentan un ligero aumento con relación a los fijados en EH-91. Además, en proyecto debe indicarse el valor nominal del recubrimiento dado por:

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

siendo $r_{\min}$ el valor mínimo del recubrimiento indicado en el artículo 37.2.4 (tabla 6), e Δr un margen de recubrimiento que varía entre 0 y 10 mm en función del tipo de elemento y del nivel de control de ejecución.

Además, en piezas hormigonadas contra el terreno, se exige un recubrimiento mínimo de 70 mm.

Cuando el recubrimiento resultante sea superior a 50 mm (salvo en el caso de piezas hormigonadas contra el terreno), debe considerarse la conve-

niencia de disponer una malla de reparto a mitad del espesor en la zona de tracción.

4.6.4. Control

El nivel de control reducido para el hormigón queda exclusivamente limitado al caso de obras de Ingeniería de pequeña importancia, a edificios de viviendas de hasta 2 plantas con luces inferiores a 6 m, y a elementos trabajando en flexión en edificios de viviendas de hasta 4 plantas con luces inferiores a 6 m.

Además, este nivel de control no es admisible cuando los hormigones estén sometidos a clases de exposición III o IV, correspondientes al caso de que se pueda producir corrosión por cloruros.

4.6.5. Tolerancias

La Instrucción EHE exige que el proyecto recoja en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares un sistema de tolerancias (artículo 96^o), con el fin de acotar las desviaciones permisibles durante la ejecución con respecto a las dimensiones especificadas en los planos y en los restantes documentos que constituyen el proyecto.

Como referencia, el Anejo 10 incluye un sistema de tolerancias que puede ser seguido en parte o en su totalidad por el proyectista.

4.6.6 Anejos

Además de los anejos que se han ido citando anteriormente, debe prestarse una especial



Se exige la disposición de separadores para garantizar los recubrimientos y la posición de la armadura.

atención a los siguientes:

- Anejo 7: Recomendaciones para la protección adicional contra el fuego de elementos estructurales.
- Anejo 8: Cálculo simplificado de secciones en E.L. de agotamiento frente a solicitaciones normales.
- Anejo 9: Análisis de secciones fisuradas en servicio sometidas a flexión simple.
- Anejo 12: Requisitos especiales recomendados para estructuras sometidas a acciones sísmicas.

Por otra parte, la Instrucción recoge en su artículo 1^o que el proyectista pueda utilizar, como opción alternativa a alguna de las especificaciones contenidas en ella, la Norma Europea Experimental UNE-ENV 1992.1.1 (Eurocódigo 2),

en cuyo caso debe obligatoriamente tenerse en cuenta el Documento Nacional de Aplicación de ésta, que se incluye en el Anejo 13.

En este sentido, también se advierte sobre la necesidad de que la utilización de otros criterios –distintos a los contemplados en la Instrucción– debe realizarse con las debidas precauciones, cuidándose especialmente su compatibilidad y coherencia, y evitando el empleo de especificaciones de origen diverso que puedan dar en su conjunto soluciones inconsistentes y no sancionadas por la práctica. ■

Julio José Vaquero García, Jefe de la División de Normativa y Tecnología del Hormigón del IECA.

Tabla 6: Recubrimientos mínimos (artículo 37.2.4)

Resistencia característica (N/mm^2)	Tipo de elemento	Recubrimiento mínimo (mm) según la clase de exposición (**)									
		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 recubrimiento al objeto de que se garantice adecuadamente la protección de las armaduras frente a la acción agresiva ambiental.

(**) En el caso de clases de exposición H, F o E, el espesor del recubrimiento no se verá afectado.