

# ESTIMACIÓN DE LA SEGURIDAD RESIDUAL EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN CON PROBLEMAS PATOLÓGICOS \*

(RESIDUAL SAFETY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES)

F. Morán Cabré, Dr. Ing. de C., C. y P.

Prof. de Investigación del Instituto Eduardo Torroja-CSIC  
ESPAÑA

Fecha de recepción: 27 - X - 94  
401-10

## RESUMEN

*Se presentan, de forma esquemática, los problemas que se plantean en la inspección, en el diagnóstico y en la estimación de la seguridad residual de estructuras de hormigón que presentan problemas patológicos, así como las técnicas y los métodos más comunes para su resolución.*

## SUMMARY

*The problems encountered in the survey, the diagnosis and the residual safety assessment of damaged reinforced concrete structures are schematically presented, together with the techniques and methods most commonly used for their solution.*

## 1. Introducción

Este trabajo pretende pasar revista a los problemas relacionados con la estimación de la seguridad residual en estructuras de hormigón afectadas de síntomas patológicos.

La estimación de la seguridad residual de las estructuras es un caso particular del problema más general del rediseño de estructuras existentes. Este rediseño es una actividad bien distinta del proyecto de estructuras nuevas. Su importancia es creciente: cada vez

es mayor el número de estructuras que se restauran o se reacondicionan, en relación con el número de estructuras que se construyen. Ello no implica que las estructuras actuales sean menos durables que las antiguas. Si cada vez es más necesaria la intervención en estructuras existentes es porque existe un parque cada vez mayor de estructuras que, aunque antiguas, pueden acondicionarse para una vida prolongada o adaptarse a nuevos usos, y porque cada vez se valoran más los elevados costes económicos, sociales y medioambientales que suponen la demolición y sustitución de las estructuras existentes.

---

\* Este artículo recoge la ponencia titulada *Seguridad residual en patología del hormigón*, presentada por el autor a las *Jornadas Técnicas sobre Durabilidad y Control de Calidad del Hormigón Armado*, celebradas en Cáceres los días 29 y 30 de noviembre de 1993.

Pese a la creciente repercusión del rediseño de estructuras en la actividad profesional cotidiana de los técnicos, es notoria la pequeña atención que se dedica al tema en los planes de estudios. La razón es que se trata de una técnica de desarrollo reciente, que incluso podría considerarse embrionario, de la que no están establecidas las bases conceptuales, sobre la que no existen tratados autorizados ni se encuentran apenas indicaciones en las normas e instrucciones, y de la que los trabajos que aparecen en la bibliografía técnica especializada son aún escasos y dispersos. Por ello, esta problemática se estudia a nivel de grupos de trabajo *ad hoc* de organizaciones internacionales de investigación y se divulga por medio de conferencias, seminarios y cursos especializados.

## 2. Informes, dictámenes y peritajes

La actuación en el rediseño de una estructura existente normalmente va precedida de un reconocimiento de la misma, que da lugar a un informe, dictamen o peritaje, en el cual se sientan las bases de las actuaciones a realizar. Conviene distinguir entre estos términos.

Normalmente se entiende por *informe* (término paralelo al *análisis clínico*) la descripción objetiva del estado de una estructura, efectuada por un técnico competente, tras un reconocimiento o inspección de la misma (precedido a su vez de la recogida y estudio de la documentación existente). En general, los informes no recogen, por tanto, opiniones y valoraciones subjetivas de sus autores.

Por el contrario, los *dictámenes* (análogos a los *diagnósticos médicos*), se basan en los informes pero incluyen la valoración subjetiva del técnico autor: expresan sus criterios y opiniones personales, definen las posibles causas de los daños y emiten un juicio crítico sobre la gravedad de la situación y sobre la posible evolución futura de la misma.

Se entiende normalmente por *peritaje* un dictamen que incluye una propuesta concreta de medidas de actuación.

## 3. Casos en que son necesarios

La gran variedad de situaciones en las que se requiere un informe, dictamen o peritaje estructural puede resumirse en las siguientes:

- La aceptación de estructuras en ejecución, en las que se ha detectado una caída de resistencia de alguno de los materiales en el control de los mismos, o bien un defecto de proyecto o de ejecución.
- La inspección rutinaria de estructuras, siguiendo el plan de mantenimiento de las mismas.
- La existencia de deterioros (visibles o sospechados) estructurales causados por ataques debidos al ambiente externo (carbonatación del hormigón, corrosión de armaduras, efectos producidos por ciclos de hielo/deshielo, etc), bajo cargas normales.
- La existencia de deterioros (visibles o sospechados) estructurales causados por ataques procedentes del interior del hormigón (cemento aluminoso, reacción árido álcali, presencia de áridos inadecuados, etc.).
- La existencia de lesiones y daños causados por cargas:
  - Cargas accidentales no consideradas en el proyecto (fuego, explosiones, choques de vehículos, etc.).
  - Cargas excepcionales consideradas en el proyecto, que han producido daños superiores a los previstos (sismo, inundación, huracanes, etc.).
  - Cargas excesivas (consideradas en el proyecto, pero con valores menores a los que realmente han actuado).
- El estudio del posible cambio de uso de la estructura, o de su uso para sobrecargas más altas que las previstas en proyecto.
- El estudio de posibles cambios estructurales, como la supresión de elementos (pilar en planta baja), el aumento del número de plantas, etc.
- Una combinación de varias de las situaciones anteriores.

## 4. Objetivos

Los principales objetivos de los estudios de patología estructural son los siguientes:

- Determinar la naturaleza, extensión y posibles causas de las lesiones y delimitar las responsabilidades correspondientes entre los implicados en las distintas fases del proceso constructivo: encargo, proyecto, materiales, ejecución, uso y mantenimiento. Éste es el caso de los informes y dictámenes periciales ligados a procesos judiciales civiles y/o penales.
- Averiguar si la estructura, en su situación actual, es capaz de seguir cumpliendo los requisitos resistentes y funcionales para los que fue proyectada con la suficiente seguridad y durabilidad.
- En caso de que así fuera, determinar si es posible utilizarla en condiciones de uso ampliadas (por ejemplo, con sobrecargas más altas), y definir cuáles son esas nuevas condiciones de uso.
- En caso de que la estructura haya perdido capacidad con respecto a los requisitos de proyecto, determinar a qué nuevas condiciones de uso restringidas podría hacer frente con la suficiente seguridad y durabilidad.
- Determinar la vida útil residual, en los casos de deterioro por problemas de durabilidad, antes de que resulte necesaria una intervención en la estructura.

## 5. Dificultades

Los técnicos encargados de realizar los estudios de patología estructural se enfrentan a una serie de dificultades en el ejercicio de su función. Las principales de estas dificultades son las siguientes:

- La falta de instrucciones, normas, recomendaciones, guías y publicaciones técnicas en general que ofrezcan criterios y reglas prácticas para el tratamiento sistemático y racional de los problemas de estimación de la seguridad y de la vida útil de las estructuras existentes.
- La diversidad de casos y situaciones posibles, análoga a la que encuentran los médicos: cada estructura, igual que cada enfermo, es un caso único e irrepetible.
- Los inconvenientes económicos, sociales (suspensión prolongada del uso) y medioambientales de la demolición y sustitución de las estructuras.



- La dificultad de obtención de una información completa o al menos suficiente sobre la estructura existente, que debería incluir la documentación de proyecto y obra; la calidad, resistencia y posibles defectos de los materiales; la definición completa del armado real; y la distribución precisa de las cargas presentes y futuras.
- La dificultad de aplicación de los métodos y técnicas de reconocimiento y ensayo actuales y de la interpretación de sus resultados, que en todo caso exigen una alta cualificación y especialización por parte de los técnicos que los realizan y valoran.
- La necesidad de suplir las lagunas en la información disponible aplicando la experiencia y el criterio propios y personales de los técnicos, como sucede en el caso del diagnóstico médico.
- La dificultad de valorar la incidencia de los defectos estructurales, y en particular de los errores de armado, de la fisuración y del deterioro y lesiones del hormigón, en el comportamiento estructural, en la seguridad de las estructuras y en la vida útil de las mismas.
- La necesidad de llegar a una valoración realista de la situación, huyendo en lo posible de caer en la tentación de cubrir las incertidumbres mediante simplificaciones más o menos groseras (admisibles sin embargo en el proyecto), que llevarían asociados inconvenientes socioeconómicos muy importantes para la sociedad en general y para la propiedad de la estructura en particular.

## 6. Diferencias con la situación de proyecto

Las dificultades que se han relacionado quedan parcialmente compensadas por algunas ventajas importantes de la situación del peritaje de estructuras existentes respecto a la del proyecto de estructuras nuevas, como son las siguientes:

- En lo que se refiere a la estimación de solicitaciones (esfuerzos) actuantes:
  - Pueden conocerse mejor las cargas permanentes, mediante mediciones de las dimensiones de la estructura, espesores de recubrimientos y acabados, densidades de materiales, etc.
  - Pueden limitarse las sobrecargas de uso (por ejemplo, en depósitos y puentes), aunque conviene actuar con prudencia en este sentido, ya que las limitaciones de uso podrían no ser respetadas, salvo si se toman disposiciones que garanticen su eficacia, lo que no siempre es posible.
  - Pueden aplicarse métodos especiales refinados de cálculo, distintos de los simplificados que se aplican habitualmente al proyecto de estructuras nuevas, que se acerquen más al comportamiento real de las estructuras (análisis no lineal, considerando las rigideces variables de las secciones, la rigidización del hormigón entre fisuras, etc.).
  - Puede obtenerse información experimental del comportamiento real de la estructura considerada bajo carga (pruebas de carga, análisis vibratorio dinámico, etc.), aunque las cargas no pueden superar demasiado las de servicio si no se quiere poner en peligro la estructura.
- En lo que se refiere a la estimación de las solicitaciones resistentes:
  - Pueden conocerse mejor la resistencia de los materiales de la estructura, en particular en sus secciones críticas.
  - Pueden medirse las dimensiones reales y determinar la situación de las armaduras, en particular en las secciones críticas.

- Puede, en ciertos casos, medirse la capacidad resistente (a rotura) de algunos elementos o secciones aisladas.

- En lo que se refiere al nivel de seguridad a alcanzar:
  - Aunque sobre este punto, de importancia central en la estimación de la seguridad y de la vida útil de las estructuras existentes, no existen criterios en las normas e instrucciones, parece que podría admitirse, de acuerdo con la propiedad, una fiabilidad estructural distinta a la de proyecto e inferior a la misma o, lo que es equivalente, una probabilidad de fallo superior o una vida útil más reducida. Para justificarlo baste tener en cuenta que se parte de una situación de estructura dañada y que se desea evitar los inconvenientes socio-económicos ligados a la demolición y sustitución de la misma. Acudiendo una vez más a la situación paralela de la patología médica, es evidente que un paciente que visita al médico con el hígado destrozado no está en condiciones de exigirle la garantía de que su hígado quedará, después de la intervención, en las mismas condiciones que tenía en el momento de su nacimiento.

## 7. Reconocimiento de la estructura y elaboración del peritaje

El procedimiento para efectuar el reconocimiento de la estructura previo a cualquier informe, dictamen o peritaje, variará en función de la estructura, de las razones y objetivos del estudio y de los requerimientos del cliente. Conviene, en cualquier caso, realizar una planificación cuidadosa de dicho reconocimiento previamente al mismo, preparando los correspondientes formularios y listas de chequeo para conseguir una recogida de datos completa y sistemática. En un caso general se distinguirán tres etapas: recogida de documentación, inspección preliminar y estudio de detalle, a las que seguirán el análisis estructural, la presentación de resultados y la redacción de conclusiones y recomendaciones de actuación, completándose así el dictamen o peritaje de la estructura.

A continuación, se pasa revista de manera esquemática a dichas etapas.

### 7.1. *Recogida de la documentación*

Esta etapa puede calificarse de muy importante. La documentación de una estructura existente puede y debe abarcar todas las fases de su génesis y de su vida hasta el momento en que se efectúa el estudio. Estas fases son las siguientes:

- Encargo y datos previos al proyecto, incluyendo los requisitos funcionales, los datos de edificios anteriores sobre el mismo solar, los datos del terreno, del medio ambiente, de los edificios próximos, etc.
- Proyecto, incluyendo por orden de importancia para el estudio patológico los planos, la memoria y en especial el anejo de cálculo, el pliego de condiciones y el presupuesto.
- Materiales, incluyendo los resultados de los ensayos de control de fabricación y recepción en obra, y especialmente los de las probetas de hormigón.
- Ejecución, incluyendo los planos de obra y el libro de órdenes, así como cualquier documentación relacionada con las modificaciones efectuadas sobre el proyecto.
- Uso de la estructura, incluyendo la historia del uso dado a la estructura, la realización de obras menores (tabiquería) y, en su caso, de modificaciones a la misma, registros climáticos, historia de la aparición y evolución de posibles síntomas patológicos, etc.
- Mantenimiento, incluyendo la documentación existente sobre inspecciones, peritajes y actuaciones sobre la estructura.

En el caso, por desgracia frecuente en nuestro ámbito, de que sea imposible obtener una documentación completa o suficiente, el reconocimiento de la estructura tendrá que ser mucho más profundo, detallado y sistemático, y por consiguiente prolongado, molesto y oneroso. A pesar de ello, no será posible eliminar muchas de las incertidumbres existentes, por lo que habrá de aceptarse, de entrada, que las conclusiones del estudio no sean tan claras y terminantes como podrían serlo de contar con una documentación completa, y que la evaluación de la seguridad residual y de la vida útil de la estructura tenga un grado de precisión notablemente menor. Sería de desear, por ello, que los propietarios de las

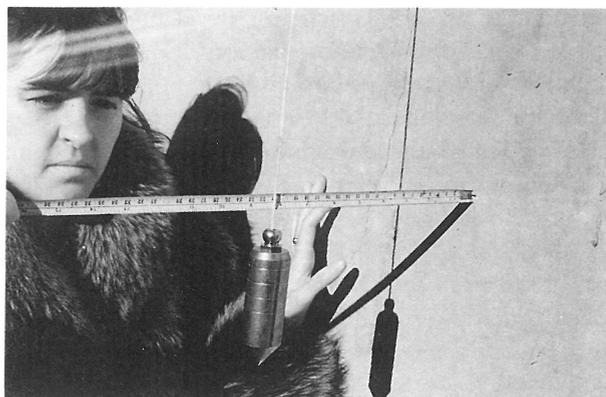
estructuras fueran conscientes de la necesidad de disponer de una documentación completa sobre las mismas y la exigieran en el momento de acceder a la propiedad, y que la legislación estableciera la obligación del vendedor de facilitar dicha documentación.

En el caso de que se cuente con una documentación suficiente, el objetivo principal del reconocimiento estructural consistirá en comprobar, mediante un muestreo aleatorio y sistemático, la coincidencia de la estructura real con la estructura que dicha documentación define. Si dicha coincidencia no es perfecta, al crecer el grado de desviación habrá que aumentar de forma proporcional la extensión y el grado de detalle del reconocimiento, hasta caer en el caso anterior, puesto que una documentación incorrecta es equivalente a una falta de documentación.

### 7.2. *Inspección preliminar*

La inspección preliminar de la estructura tiene los siguientes objetivos:

- Establecimiento del esquema estructural y del funcionamiento general de la estructura: elementos, sustentaciones, transmisión de cargas, etc.
- Inspección visual y fotográfica. Las fotografías pueden completarse por tomas en video, que pueden incorporar registro de voz. Todas las anotaciones que se tomen durante la inspección visual, así como las fotografías, deben ir referidas a su localización en planos indicando claramente la situación en planos de los elementos visualizados o fotografiados para su posterior identificación.
- Localización de posibles zonas patológicas. Es fundamental que el técnico que realiza la inspección aplique su experiencia a la localización de las posibles zonas con problemas patológicos. Dichas zonas pueden incluir, entre otras:
  - Zonas con tensiones elevadas (apoyos, nudos, centros de vano, etc.).
  - Zonas débiles y propensas a coqueas (zonas de cabeza y pie de pilares, nudos, zonas de armado demasiado denso o mal definido en planos, etc.).



- Zonas sensibles a deterioros físicos y/o químicos (zonas a la intemperie, zonas interiores húmedas en baños y cocinas, etc.).
- Zonas con fisuras y desperfectos aparentes.
- Selección de técnicas a aplicar, en la que también juega un papel importante la experiencia del técnico.

### 7.3. Estudio de detalle

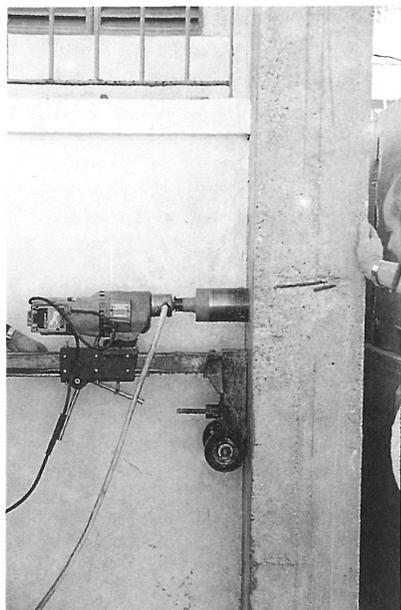
El estudio de detalle persigue en general la definición completa de la estructura existente, y en particular la de sus zonas, elementos y secciones críticos, con vistas al posterior estudio analítico que permita evaluar la seguridad residual y la vida útil. Los principales objetivos concretos son los siguientes:

- Definición de las dimensiones generales de la estructura, y de las de los elementos y secciones de la misma, así como la evaluación precisa de las cargas permanentes. A estos efectos suele ser preciso realizar un plan sistemático de rozas aleatorias para medir dimensiones de secciones y espesores de capas de compresión, de capas de nivelación, de solados, de pavimentos, etc.
- Definición del armado. Este apartado es de especial importancia por su repercusión en la capacidad resistente de la estructura. Como se ha dicho, si existen planos de armado deberá procederse a una comprobación de la concordancia de las armaduras reales con los mismos. Para ello se hará un plan sistemático de rozas aleatorias midiendo en ellas los recubrimientos y diámetros de las barras. Estas rozas, relativamente caras y molestas, irán precedidas y complementadas

por un programa más amplio de detección magnética de armaduras mediante pacómetro, técnica sencilla y barata, que permite identificar el trazado general del armado, localizar las zonas donde pueden esperarse desviaciones y por tanto conviene efectuar las rozas, y servir para el calibrado del pacómetro. Si no existen planos o se detectan discordancias importantes con las armaduras reales, el muestreo será más intenso y detallado, debiendo incluir elementos tipo (forjados, vigas y pilares) y dentro de ellos zonas correspondientes a detalles de armado tipo. Deberán comprobarse con especial cuidado los recubrimientos, dada su incidencia en la capacidad resistente (sobre todo, en vigas y forjados) y en la durabilidad de la estructura. También es importante detectar posibles defectos en los armados tipo utilizados (falta de armaduras necesarias, trazados incorrectos de armaduras, anclajes insuficientes, concentración excesiva de barras que impide la penetración del hormigón, etc.), que muchas veces tienen una repercusión patológica directa.

- Estudio de las calidades y resistencias de los materiales. Apartado de máxima importancia, lo mismo que el anterior. La calidad y resistencia del acero pueden comprobarse mediante la extracción de muestras de barras, eligiendo preferentemente zonas de menor responsabilidad estructural. La del hormigón, mediante extracción de probetas testigo según un plan sistemático. Esta técnica es cara, molesta y puede debilitar la estructura, por lo que debe ser precedida y complementada por una campaña más amplia de ensayos no destructivos (esclerómetro, ultrasonidos, etc., véase más adelante) más rápidos y baratos, que permiten localizar zonas de posibles caídas de resistencia, pero que por ser menos precisos requieren en todo caso de una calibración *in situ* mediante testigos. La extensión e intensidad de estas campañas dependen de las siguientes circunstancias:

- La variabilidad de resistencias en los distintos materiales estructurales, que es mucho mayor en el hormigón que en el acero.
- La influencia de la resistencia del material en la capacidad del elemento, siendo a este respecto conocido que la capacidad de los pilares suele venir determinada por la resistencia del hormigón, mientras que la de vigas y forjados suele venir determinada por la resistencia del acero.



— La responsabilidad resistente del elemento considerado, que es mayor en pilares que en vigas y forjados, dado que las zonas afectadas por posibles fallos estructurales son mayores y que el fallo no suele ir precedido por aviso.

— La fiabilidad de los métodos y técnicas utilizados (véase apartado 7.6).

- Detección y estudio de coqueas y zonas deterioradas. A este efecto, la inspección preliminar se completará mediante ensayos físicos y químicos de las posibles zonas afectadas, mediante las técnicas de ensayos físicos y químicos que se describen más adelante (apartado 9).

#### 7.4. *Análisis estructural*

Sobre la base de la documentación de la estructura, completada con los datos obtenidos en el reconocimiento de la misma, así como con los aportados por la experiencia y juicio crítico del perito, hay que proceder a un análisis estructural que permita extraer conclusiones acerca de:

- Las causas de los daños estructurales.
- La importancia de los mismos.
- Su evolución previsible con el tiempo.
- Su posible repercusión en la seguridad de la estructura.

Y hacer previsiones y estimaciones en relación con:

- El comportamiento futuro de la estructura.
- La seguridad residual de la misma.
- Su vida útil probable.

para llegar a las recomendaciones de actuación.

Una vez más, este análisis sólo debe encomendarse a técnicos especializados de reconocida experiencia en el terreno de la patología estructural.

Los métodos y técnicas sobre los que se basa el análisis estructural en casos de patología se describen en el apartado 10.

#### 7.5. *Presentación de resultados*

Las modernas técnicas conducen, en muchos casos, a un enorme volumen de información procedente de la documentación y de los resultados de los ensayos y análisis estructurales, que es preciso presentar de una forma ordenada y compacta para facilitar su estudio e interpretación, así como la extracción de conclusiones sobre los mismos.

En este contexto conviene, en general:

- Presentar los resultados en forma de tablas de fácil interpretación.
- Utilizar gráficos y esquemas alternativos a las tablas, para facilitar la visualización de grandes cantidades de datos, a ser posible trazados de forma automática por programas de ordenador, para evitar los altos costes y plazos y los posibles errores asociados con el uso de una delineación tradicional.
- Incluir un análisis estadístico de los resultados que permita caracterizar series de ellos por parámetros representativos, como son valores medios, desviaciones típicas, etc.

#### 7.6. *Interpretación de resultados*

Es una fase especialmente delicada, en la que resulta imprescindible la experiencia y el buen criterio profesional del especialista que la realiza. En este contexto, es preciso tener en cuenta que:

- La fiabilidad de los resultados experimentales, muy importante para aumentar la confianza en los mismos, depende de:
  - La precisión del equipo usado.
  - La experiencia de los operarios que lo utilizan.
  - La repetibilidad del ensayo.
  - El número de muestras ensayadas.
  - El tamaño de las probetas.
  - La correlación de la magnitud medida con la propiedad mecánica, física o química estudiada (así, por ejemplo, el esclerómetro no mide directamente la resistencia del hormigón, sino la dureza superficial del mismo).

### 7.7. Diagnóstico y conclusiones

La valoración de los resultados no puede ser completamente objetiva, sino que depende fuertemente, como se ha dicho, del técnico que realiza el diagnóstico estructural, que debe interpretar dichos resultados a la luz de su experiencia profesional para llegar a establecer conclusiones sobre la importancia real de los daños o defectos estructurales y las causas probables de los mismos.

Sobre la base de dichas conclusiones acerca de la importancia de los daños y sus causas, es posible, en general, estimar la seguridad residual de la estructura, predecir su comportamiento futuro y evaluar su vida útil, en relación con los requisitos considerados, siendo estas últimas actividades especialmente delicadas, difíciles y subjetivas.

### 7.8. Recomendaciones de actuación

A la luz de la documentación existente sobre la estructura, de la información proporcionada por su reconocimiento, de los análisis efectuados, de las conclusiones del diagnóstico de causas, de la estimación de la seguridad residual, de la predicción de la evolución de los daños y del comportamiento futuro de la estructura y de la evaluación de su vida útil, el autor del peritaje propondrá recomendaciones concretas de actuación, que podrán consistir en algunas de las medidas que se enumeran en el apartado siguiente.

### 8. Posibles acciones a tomar

Las distintas acciones a considerar en función de la situación de la estructura en relación con los requisitos establecidos son las siguientes:

- Estructura adecuada: no hacer nada
- Resultados no suficientemente concluyentes: estudio ampliado y realización de un nuevo peritaje.
- Síntomas de problemas de durabilidad, de importancia menor pero que pueden aumentar con el transcurso del tiempo: monitorización de la estructura. Vigilancia de la misma. Posible formulación de un plan de inspecciones periódicas.
- Defectos locales de menor importancia: corrección de los mismos.
- Defectos extendidos de cierta importancia, pero que no afectan seriamente a la seguridad estructural: reparación de los mismos.
- Defectos importantes que afectan a la seguridad: refuerzo de la estructura.
- Defectos importantes de reparación imposible o excesivamente costosa: declaración de la estructura (uso restringido, sobrecargas limitadas, etc.).
- Defectos muy importantes, de reparación imposible o excesivamente costosa: demolición y sustitución de la estructura.

La elección final entre estas posibles soluciones, cuando existen varias que pueden aplicarse de forma alternativa, no suele estar en manos del autor del peritaje, y debe ir precedida de una comparación cuidadosa entre las mismas, teniendo en cuenta sus ventajas, inconvenientes, costes y consecuencias de tipo técnico, económico, social y ecológico.

En este estudio comparativo debe intentar minimizarse el coste generalizado:

$$C_g = C_i + C_m - V_r + \sum C_f p_f$$

resultando normalmente difícil estimar los costes  $C_f$  ligados a la puesta fuera de servicio de la estructura, que implican muchas veces vidas y perjuicios sociales de difícil traducción monetaria. También en esta estimación es imposible eliminar los componentes subjetivos.

## 9. Técnicas de reconocimiento

Las principales técnicas de ensayo existentes para el reconocimiento y evaluación de estructuras existentes pueden agruparse en técnicas de ensayos estructurales, de ensayos físicos y de ensayos químicos y electroquímicos. A continuación, se pasa revista, de forma esquemática, a las más importantes.

### 9.1. Ensayos estructurales

- Pruebas de carga. En ellas, la estructura o una parte de la misma (zona de forjado) se instrumenta *in situ* y se somete a la actuación de una sobrecarga que puede llegar a la de servicio o incluso superarla, aunque sin llegar a la de cálculo, para no poner en peligro la integridad estructural. Durante un proceso de carga creciente por escalones se miden las flechas, las deformaciones unitarias en el hormigón y en las armaduras en secciones críticas, y se controla la evolución de las fisuras. Se trata de ensayos caros, que requieren una instrumentación delicada y la colocación de cargas importantes. La información obtenida consiste en las rigideces reales y en el comportamiento estructural para cargas de servicio. Se obtienen datos valiosos, que permiten eliminar muchas incertidumbres en relación con el modelo estructural y sus características reales, aunque limitados a dicha fase de servicio y de dudosa extrapolación para obtener las cargas de agotamiento.
- Monitorización de la estructura. Ante situaciones de incertidumbre, la estructura se instrumenta y se monitoriza, siguiendo la evolución en el tiempo de sus flechas y su fisuración, o bien su proceso de deterioro por carbonatación del hormigón, corrosión de las armaduras, etc. Se realizan inspecciones y medidas periódicas para decidir el momento más adecuado para una intervención.
- Ensayos dinámicos vibratorios. Consisten en la instrumentación de la estructura, en la aplicación a la misma de cargas dinámicas oscilantes mediante vibradores rotatorios de masa excéntrica o mediante gatos dinámicos, y en la medida de su respuesta elástica. Se obtienen los mismos parámetros que en una prueba de carga, así como otros relativos al comportamiento dinámico. La técnica es más sofisticada, pero puede resultar más económica debido a la menor magnitud de las cargas aplicadas.



- Ensayos a rotura. Proporcionan la información más completa, pero normalmente sólo pueden realizarse en zonas, elementos o secciones aisladas, o bien en estructuras que van a ser demolidas.

En todos estos ensayos estructurales se miden las siguientes magnitudes:

- Las flechas, mediante dispositivos mecánicos, ópticos y eléctricos.
- Las aceleraciones, mediante acelerómetros.
- El ancho de fisuras, mediante microscopios ópticos y reglas de comparación.
- Las deformaciones unitarias, con dispositivos mecánicos y con *strain gages* que miden los alargamientos como variaciones de resistencia eléctrica.

### 9.2. Ensayos físicos

#### *Determinación de la resistencia*

- Extracción y ensayo de probetas testigo: mediante sondas tubulares rotatorias se extraen probetas cilíndricas cuyas caras extremas se cortan con disco. Cuando se extraen de pilares conviene elegir el tercio superior, en el que las resistencias pueden ser menores, aunque en esa zona la extracción sea más incómoda, y evitar las proximidades de las esquinas. Es una técnica cara y molesta. Los huecos producidos deben rellenarse, no siendo posible en general reponer las armaduras cortadas en su caso.
- Esclerómetro (martillo Schmidt): proporciona una estimación de la resistencia mediante la

medida de la dureza superficial. Un pequeño cilindro de acero se proyecta contra la superficie de la pieza, y se mide su rebote. La superficie debe limpiarse y alisarse previamente. La determinación se obtiene como la media entre varias medidas para disminuir las fuertes dispersiones. La precisión es reducida, ya que no se mide directamente la resistencia, sino de una propiedad superficial relacionada con ella. Conviene calibrar el aparato con las resistencias obtenidas de testigos de la misma obra. Una exploración esclerométrica amplia es aconsejable como complemento de otra de extracción de testigos, y permite detectar posibles zonas críticas en las que centrar luego dicha campaña.

- Ultrasonidos: el método consiste en la medida de la velocidad de propagación de ondas o impulsos en la masa del hormigón, o bien de la absorción de la energía de las mismas. Se funda en que ambas propiedades están ligadas con las constantes elásticas del medio y por tanto con su resistencia.
- Otros: existen otros procedimientos de medir la resistencia del hormigón, como son el *pull-out* (perforación circular, inserción de un anillo expandible y extracción del mismo aplicando una fuerza de tracción) y el *break-off* (rotura a cortante y flexión de una probeta cilíndrica formada dentro de la masa de hormigón endurecido al haber dejado un cilindro metálico en el hormigón fresco que luego se extrae). Las resistencias medidas tienen una correlación determinada con la resistencia a compresión.

#### *Detección de coqueras*

- Ultrasonidos: las ondas que viajan a través de la masa del hormigón encuentran una resistencia mucho mayor cuando tienen que pasar a través de una zona de aire (coquera), lo que disminuye fuertemente su velocidad y atenúa la energía transmitida.
- Otros: también pueden localizarse las coqueras mediante radiografías, gammagrafías y aparatos de radar.

#### *Localización de armaduras*

- Pacómetro: para localizar las armaduras y estimar su recubrimiento y su diámetro se emplea el pacómetro o detector magnético de armaduras, que mide las variaciones que la presencia de las

barras produce en un campo magnético. Se trata de un aparato de precisión relativa, que debe estar calibrado mediante armaduras cuyos recubrimientos y diámetros hayan sido medidos mediante rozas. Es útil para comprobar la existencia de cercos y estribos.

- Rayos X: también pueden localizarse las armaduras mediante radiografías y gammagrafías.

#### *Permeabilidad y difusión de gases*

La porosidad del hormigón, propiedad que determina la durabilidad del mismo, está fuertemente relacionada con su permeabilidad al agua y a la difusión de gases. Para medir estas propiedades se emplean las siguientes técnicas:

- Absorción del agua: se seca una probeta a 105° C y se sumerge en agua durante media hora. La absorción se expresa como el porcentaje de peso ganado por la muestra.
- Permeabilidad al agua: para medirla se establece una diferencia de presión entre las dos caras de una probeta y se mide la cantidad de agua que pasa por unidad de tiempo.
- Difusión de gases: se mide de forma análoga, midiendo el flujo de un determinado gas a través de la probeta en condiciones determinadas de presión y temperatura.

### **9.3. Ensayos químicos y electroquímicos**

#### *Determinación de la dosificación*

- Contenido del cemento y relación áridos/cemento: Se determinan analíticamente el residuo insoluble en clorhídrico y las proporciones de óxido de silicio y de cal. Conocidas estas determinaciones, el contenido de cemento y la relación áridos/cemento se determinan aplicando fórmulas estándar.
- Relación agua/cemento: conocido el contenido de cemento, es necesario determinar el de agua. Para ello se determinan el agua capilar y el agua combinada. La primera, secando una probeta a 105° C y sumergiéndola luego en tetracloruro de carbono. La segunda, moliendo la probeta y calentándola en horno a 1.800° C en una corriente de nitrógeno.

### *Tipo de cemento*

- El tipo de cemento puede conocerse si se determinan por espectrofotometría los contenidos en óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y férrico  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Si se desea detectar un cemento aluminoso, debe emplearse la técnica de análisis térmico diferencial.

### *Contenido de cloruros*

- Está muy relacionado con el peligro de corrosión de las armaduras. Los cloruros pueden proceder del hormigón inicial o del exterior (agua del mar o sales de deshielo). En el primer caso, la concentración de cloruros será constante con la profundidad, mientras que en el segundo disminuirá linealmente con la misma.

### *Profundidad de carbonatación*

- La carbonatación es el resultado de la reacción del  $\text{CO}_2$  del aire con los álcalis presentes en el hormigón. Su efecto es rebajar el pH del hormigón y facilitar la corrosión de las armaduras cuando su profundidad supera el recubrimiento de las mismas. Para averiguar la profundidad de la carbonatación se extrae una probeta y se rocía un corte de la misma con un spray de fenoltaleína. La zona que se tiñe de rosa está sana, por tener un pH alto.

### *Potencial eléctrico entre la superficie y las armaduras*

- Permite averiguar si las barras están despasivadas, en cuyo caso la presencia de oxígeno y de humedad puede provocar su corrosión.

### *Resistividad*

- Midiendo la resistividad del recubrimiento del hormigón puede predecirse la velocidad de la corrosión de las armaduras.

## **10. Análisis estructural y estimación de la seguridad residual**

### **10.1. Métodos probabilistas y semiprobabilistas**

Las magnitudes que intervienen en la comprobación de la seguridad de cualquier estructura son de naturaleza aleatoria, dado que no pueden conocerse de forma exacta, ya se trate del proyecto de una estructura nueva o del rediseño de

una estructura existente. En efecto, las dimensiones de los elementos estructurales, definidas en los planos, están sujetas a los errores y tolerancias de la ejecución, por lo que en la realidad tendrán una cierta variabilidad. Lo mismo puede decirse de las resistencias de los materiales. Las cargas y las sobrecargas a las que estará sometida la estructura son, por su propia naturaleza, magnitudes estocásticas, y sólo pueden representarse mediante variables aleatorias. Por último, los métodos de análisis de esfuerzos (solicitaciones actuantes) y de cálculo de solicitaciones resistentes admiten que la estructura se comporta de acuerdo con modelos teóricos que constituyen, en el mejor de los casos, aproximaciones al comportamiento real de la estructura, y están sujetos por tanto a inevitables incertidumbres.

Un cálculo de estructuras *probabilista* consistiría en definir, para cada posible sección crítica de la estructura y para cada una de las solicitaciones actuantes en la misma, la distribución de frecuencias asociada con la sollicitación actuante máxima en la vida útil de la estructura,  $S$ . Seguidamente se estimaría, para las mismas secciones y sollicitaciones, la distribución de frecuencias de la sollicitación resistente asociada,  $R$ . Se comprobaría, por último, que el valor de la probabilidad de que sea  $S > R$  no excede una probabilidad de ruina prefijada,  $p_f$ .

Si bien el cálculo probabilista es de aplicación demasiado complicada para su uso en el proyecto normal de estructuras nuevas, su aplicación al caso de la estimación de la seguridad residual de estructuras existentes, o lo que es igual de la probabilidad de fallo de las mismas, puede justificarse en algunos casos, ya que puede permitir estimaciones más afinadas y realistas, siempre que sea posible conocer o estimar las distribuciones de las magnitudes que intervienen en dicho cálculo.

En el proyecto de estructuras nuevas los diferentes códigos y recomendaciones internacionales admiten el empleo de *métodos semiprobabilistas*. En ellos se reconoce la naturaleza aleatoria de las cargas que solicitarán a las estructuras proyectadas, las cuales se representan por valores característicos. Para estos valores se eligen normalmente los que presentan una probabilidad del 5 por ciento de ser sobrepasados durante la vida útil de la estructura. A dichos valores característicos de las cargas se les aplica un coeficiente de seguridad parcial,  $\gamma_f$ , obteniéndose los valores de las cargas de cálculo. Con dichas cargas se obtienen, de forma determinista, las sollicita-

ciones actuantes en las secciones críticas de la estructura,  $S_d$ . De forma paralela, se reconoce la naturaleza aleatoria de las resistencias de los materiales, que se representan por valores característicos, elegidos de forma que existe la probabilidad del 5 por ciento de que la resistencia en un punto cualquiera de la estructura sea inferior a la resistencia característica. A las resistencias características se les aplican coeficientes de seguridad parcial  $\gamma_c$  y  $\gamma_s$ , obteniéndose los valores de las resistencias de cálculo. Con estos valores se obtienen, de forma determinista, los valores de las solicitaciones resistentes en las secciones críticas,  $R_d$ . Por último, la estructura se considera satisfactoria cuando en cada sección y para cada solicitación se verifica la condición  $S_d \leq R_d$ .

### 10.2. Análisis de esfuerzos

El análisis de esfuerzos es el proceso mediante el cual, a partir de las cargas o acciones y de las dimensiones y otras propiedades estructurales (rigideces, etc.), se obtienen los esfuerzos o solicitaciones actuantes en las secciones críticas, así como las deformaciones en caso de que éstas sean limitativas del comportamiento estructural.

En la práctica habitual del proyecto se admite tomar como base para el cálculo de esfuerzos modelos simplificados del comportamiento estructural. El modelo usado habitualmente es el Resistencia de Materiales elemental: teoría lineal de primer orden (pequeñas deformaciones); material elástico lineal con rigideces constantes correspondientes a las secciones brutas de hormigón, sin considerar las armaduras (admitiendo en algún caso redistribuciones limitadas para el armado de vigas y forjados); y cargas estáticas. Este modelo lineal permite una aproximación razonable al comportamiento de las estructuras ordinarias de edificación bajo cargas de servicio, salvo para el cálculo de flechas, en el que es preciso tener en cuenta las rigideces de las secciones fisuradas, la colaboración de las armaduras y las deformaciones diferidas del hormigón (fluencia). Son conocidas no obstante sus limitaciones a la hora de predecir la carga última o de rotura de estructuras hiperestáticas o que presentan problemas de no linealidad geométrica o de deformaciones diferidas. En estos casos, la utilización de modelos de análisis no lineal más realistas, si bien es más compleja, permite acercarse más al comportamiento real de las estructuras y predecir mejor sus cargas de agotamiento, que en el caso de estructuras hiperestáticas pueden ser bastante mayores que

las pronosticadas por el modelo lineal.

Para la evaluación de la seguridad de estructuras existentes es necesario, con carácter general, acudir a los modelos de análisis no lineal de estructuras. Por una parte, se conoce (o puede estimarse) el armado de las mismas, por lo que sería ilógico calcularlas usando las rigideces correspondientes a secciones brutas de hormigón. Por otra, se consigue así una predicción más realista y en general más favorable de las cargas últimas.

### 10.3. Cálculo de solicitaciones resistentes

Para el cálculo de las solicitaciones resistentes conviene usar asimismo métodos afinados. Por ejemplo, para solicitaciones normales se usará el método del diagrama parábola-rectángulo para el hormigón, descartando el método del rectángulo y con mayor motivo el del momento tope. Como resistencia del hormigón se tomará la estimada de los ensayos de probetas testigo sin necesidad de efectuar la reducción del 10 por ciento por hormigonado vertical, puesto que se habrán tomado dichos testigos del tercio superior de los soportes. Como diagrama tensión/deformación de los aceros se usará el correspondiente al acero realmente usado. La sección se calculará usando un diagrama adimensional que corresponda a la configuración exacta de armado y al recubrimiento relativo preciso, o bien un programa de ordenador que tenga en cuenta cada una de las barras de la armadura. El pandeo se tendrá en cuenta aplicando un método refinado, debiendo descartarse el uso de la fórmula de la excentricidad equivalente de la Instrucción EH-91. En el caso de secciones a flexión, especialmente si se trata de vigas planas, será necesario tener en cuenta la existencia de armaduras comprimidas aunque no sean estrictamente necesarias por cálculo.

### 10.4. Fijación y estimación de los coeficientes parciales

Si la seguridad se estima aplicando un método semiprobabilista, deberá tenerse en cuenta que los valores de los coeficientes parciales de seguridad pueden disminuirse con respecto a los usados en el proyecto de estructuras nuevas, para tener debidamente en cuenta:

- Las diferencias existentes entre dicha situación de proyecto y la de rediseño de estructuras existentes, enumeradas en el apartado 6.

- El hecho de que una parte de los coeficientes parciales de seguridad se destina a cubrir incertidumbres en la puesta en obra del hormigón, en la calidad de la ejecución y en las tolerancias constructivas, en las cargas de peso propio, en las sobrecargas, en los modelos empleados en el análisis de estructuras, etc., y que muchas de estas incertidumbres pueden ser en parte eliminadas mediante el estudio de la estructura existente.
- El hecho de que para las estructuras existentes con problemas patológicos resulta posible según nuestro criterio y tal como se expuso en el apartado 6, admitir, de acuerdo con la propiedad, una fiabilidad menor, una probabilidad de fallo mayor o una vida útil más corta que para las estructuras nuevas.

Concretando, el valor del coeficiente de mayoración de acciones  $\gamma_f$  que puede aceptarse en el peritaje de una estructura existente dependerá de la responsabilidad del elemento estructural, del nivel de la investigación desarrollada y de la existencia de síntomas de aviso previos al fallo del elemento. Para condiciones medias, elementos de gran responsabi-

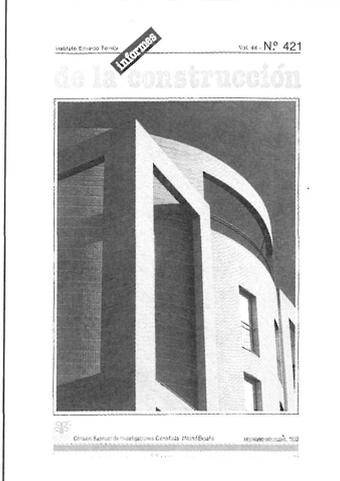
lidad (pilares) y estudio intenso de resistencias y cargas permanentes, podría reducirse al menos en un 10 por ciento con respecto al usado en el proyecto. Para elementos de responsabilidad media (forjados y vigas), con estudio reducido de resistencias (al no ser posible hacerlo en todas las secciones) pero con ductilidad que facilite la redistribución de esfuerzos y el aviso, también podrían reducirse en un 10 e incluso llegar a un 15 por ciento. Estos coeficientes de mayoración se aplicarán a las cargas permanentes reales estimadas y a las sobrecargas estimadas, que pueden ser menores que las de proyecto si se establecen limitaciones a las mismas (véase apartado 6).

Para la resistencia de cálculo del hormigón puede usarse la resistencia estimada de los ensayos de probetas enmoldadas de obra, si se dispone de la documentación completa de dichos ensayos y los valores de la resistencia estimada son superiores a los de la especificada. También puede usarse el valor de la resistencia estimada a partir del ensayo de testigos, aplicando a la misma un coeficiente de minoración de resistencias del hormigón  $\gamma_c$  reducido en un 20 por ciento, si se ha hecho una investigación intensa de resistencias.

\* \* \*

## Publicación del Instituto Eduardo Torroja - CSIC

Número monográfico de INFORMES

	<p><b>La fábrica armada</b> (n.º 421)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— La arquitectura de ladrillos del siglo XIX: racionalidad y modernidad.</li> <li>— Razón y ser de la fábrica armada.</li> <li>— El desarrollo de armaduras para tendeles a lo largo de dos décadas.</li> <li>— Avances en la construcción de obras de fábrica.</li> <li>— La postura holandesa frente al control de la fisuración.</li> <li>— Arquitectura e investigación con fábrica armada.</li> <li>— Cálculo de la fábrica armada.</li> <li>— Cálculo de estructuras de fábrica armada contra el seísmo.</li> <li>— La armadura tridimensional para la fábrica armada.</li> <li>— Las bóvedas de la Atlántida.</li> </ul>
---	--