

# Análisis de la calidad del hormigón de una estructura existente. Aplicación al antiguo mercado de frutas y verduras de Legazpi

*Analysis of the quality of the concrete of an existing structure. Application to the old fruit and vegetable market in Legazpi.*

Jesús M<sup>a</sup> Rodríguez<sup>a</sup> Eduardo Díaz-Pavón<sup>b,\*</sup>, Raúl Rodríguez Escribano<sup>c</sup>

a: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Jefe de Departamento de Estructuras. jmrodriguez@intemac.es

b: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Director del Área de Evaluación y Patología de Estructuras.  
ediazpavon@intemac.es

c: Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC). Director de la División de Estudios

## RESUMEN

En este trabajo se comentan algunos aspectos del planteamiento de la investigación de la calidad del hormigón y los resultados obtenidos en la evaluación de estructuras existentes. En concreto se comenta su aplicación a los estudios realizados anteriormente y durante las obras de rehabilitación que se están llevando a cabo en la estructura del antiguo mercado de Legazpi, en Madrid. Construida hacia 1929 en hormigón armado, cuenta con unos 1000 pilares, de los que, en diferentes fases de la investigación, se extrajeron alrededor del 10% de los testigos y se realizaron mediciones de ultrasonidos en todos ellos.

## ABSTRACT

This paper discusses some aspects of both the approach to concrete quality investigation campaigns and the results obtained in the assessment of existing structures. In particular it is analysed their application to the studies previously carried out and during the refurbishment works being carried out on the structure of Legazpi old market, in Madrid, are commented. Built around 1929 in reinforced concrete, it has about 1000 columns, from which, in different phases of research, about 10% of the cores were extracted and ultrasonic measurements were carried out on all of them.

**PALABRAS CLAVE:** hormigón, evaluación, estructura existente

**KEYWORDS:** concrete, assessment, existing structure

## 1. Introducción

La estimación de la resistencia del hormigón es uno de los principales condicionantes en la evaluación de estructuras existentes. La norma UNE EN13791:2020 *Evaluación de la resistencia a compresión in situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón* [1] establece un marco normativo en el que basar el planteamiento de dicha investigación e interpretación de los resultados.

A efectos de caracterización de dicha resistencia, dicha Norma establece en 8 el mínimo número de testigos por cada región de ensayo. Sin embargo, las dificultades de establecer en la mayoría de casos el tamaño de las regiones de ensayo; la necesidad de tener el citado número mínimo de puntos de ensayo en cada región de ensayo para que el nivel de confianza de los resultados obtenidos sea suficiente; las propias características del hormigón en la mayoría de estructuras antiguas

(especialmente en aquellas anteriores a los años 80 del pasado siglo, aunque no exclusivamente), con coeficientes de variación de las resistencias que suelen rondar el 25 %; unido a las propias limitaciones tanto por condicionantes económicos como por el daño que le supone a la estructura la extracción de testigos, hacen que para obtener información suficiente de cara a la evaluación sea normalmente recomendable combinar dichos testigos con la medida del impulso ultrasónico. De hecho, la citada normativa en su Anexo A (informativo) contempla esta opción.

Así se ha realizado previamente y durante las obras de acondicionamiento que se están llevando a cabo en la estructura del Antiguo Mercado de Legazpi de Madrid, construida en torno al año 1929 en hormigón armado y que cuenta con unos 1000 tramos de pilar, de los cuales, en diferentes fases de investigación, se extrajeron testigos en torno al 10 % de los mismos y se realizaron medidas de ultrasonidos en todos ellos.

En la presente comunicación se comentan algunos aspectos tanto relativos al planteamiento de las campañas de investigación de la calidad del hormigón como sobre los resultados obtenidos.

## 2. Descripción general del antiguo Mercado de Frutas y Verduras de Legazpi

El Mercado de Legazpi era un mercado de abastos especializado en la distribución de verduras y hortalizas ubicado junto a la plaza de Legazpi en el distrito de Arganzuela (sur de Madrid). Su construcción comenzó en 1926, inaugurándose el 23 de abril de 1935.

Actualmente está siendo objeto de una rehabilitación integral para alojar en él oficinas municipales.

Tiene planta triangular y dos plantas en altura, siendo la estructura de hormigón armado (véase la figura 1). Dicha estructura se encuentra dividida en 10 módulos separados por juntas de dilatación.

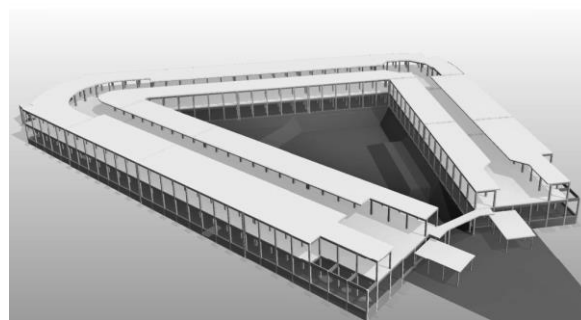


Figura 1. Vista 3D del mercado

Tanto el forjado de cubierta como el forjado inferior (suelo de planta primera) son losas nervadas apoyadas en pórticos de hormigón, con luces que en general son de 6,5 m. Entre nervios existe una losa de hormigón armado que, salvo en el vano central del forjado inferior y en el voladizo de cubierta, tiene un espesor de 10 cm. En dicho vano central el espesor de la losa es de 20 cm, en tanto que el voladizo de cubierta se resuelve mediante losas de canto variable entre 11 y 20 cm de espesor. Los soportes son todos de hormigón armado, la mayoría de  $50 \times 50$  cm, armados lógicamente con acero liso, con cuantías bajas en todos los casos (cuantías mecánicas en torno al 13 %).

En las figuras 2 y 3 se muestran unas vistas de la estructura.



Figura 2. Vista de la planta superior



Figura 3. Vista de la planta baja

## 3. Planteamiento del estudio de la calidad del hormigón

Estaba condicionado por los siguientes aspectos:

- No se disponía de información alguna sobre la calidad del hormigón prevista en Proyecto.
- Tampoco se disponía de información alguna sobre la propia ejecución, y en concreto, del ritmo de esta.

- La calidad del hormigón era presumiblemente baja en relación con los estándares actuales, siendo esperables, a la vista de la experiencia de INTEMAC en estructuras de la misma época, elevadas dispersiones (por encima del 25 %) así como resistencias características bajas (muy probablemente por debajo de 15 MPa).
- La actuación inicialmente prevista no preveía incrementos de carga sobre los soportes, sino al contrario (al menos sobre el forjado inferior, las sobrecargas inicialmente previstas eran reducidas en relación con las de uso como mercado, donde se preveía el tráfico de vehículos sobre el mismo; finalmente, el proyecto actualmente en ejecución contempla la ejecución de algunas entreplantas, y en algunos tramos las solicitaciones son incluso mayores que las que se debieron prever originalmente).

En estas condiciones, se propuso una caracterización del hormigón general de la obra, considerándose inicialmente todo el hormigón correspondiente a una única población. Lógicamente, el tamaño de esta hacía que no fuera descartable una posible clasificación del hormigón en las diferentes plantas y módulos en función de su calidad, aspecto que se analizaría igualmente a partir de los resultados de los ensayos inicialmente propuestos.

Para ello sería necesaria una campaña suficientemente amplia de ensayos destructivos y no destructivos de manera que la información obtenida fuera representativa de la mayor parte del Mercado.

No obstante, dadas las incertidumbres inherentes a la realización de los ensayos no destructivos, así como por la importancia del tamaño de la muestra de testigos para que la correlación entre los resultados de las roturas a compresión y las medidas de dichos ensayos no destructivos fuera suficientemente buena, el número de testigos inicialmente propuesto fue tal que, sólo con ellos, permitiera obtener una

resistencia característica de la estructura con un nivel de confianza suficiente.

En todo caso, si el resultado de la correlación fuera suficientemente bueno, esta permitiría ampliar el tamaño del muestreo mediante ensayos no destructivos a los soportes que pudiera ser necesario en fases posteriores.

Con base en este planteamiento, en una **primera fase** se plantearon las siguientes investigaciones:

- Extracción y posterior rotura de 36 probetas testigo de hormigón endurecido (distribuidos aleatoriamente por las dos plantas del Mercado), con base en los cuales se pudo realizar una primera estimación de la resistencia característica del hormigón.
- Realización de ensayos de ultrasonidos (medida de la propagación del impulso ultrasónico en el hormigón) en los 36 pilares, tanto en fuste (media altura), como en cabeza, así como en 36 soportes adicionales. Estos ensayos permitían:
  - Analizar sobre una muestra suficientemente representativa la posible variabilidad en altura de la resistencia del hormigón, ya que no era descartable que dentro de un mismo pilar existan tongadas de peor calidad, especialmente en su tramo superior. De hecho, hasta la Instrucción EH-91 [2], debía reducirse la resistencia de cálculo del hormigón en un 10 % en elementos hormigonados verticalmente, en particular en pilares.
  - Establecimiento de una doble correlación de resultados (resistencia-velocidad de ultrasonidos), lo que permitiría, en fases posteriores, asignar resistencias al hormigón empleado

en los puntos de realización de ensayos no destructivos.

- Estimación de la resistencia característica y de cálculo del hormigón con un mayor nivel de confianza que la que se deduciría de dicha estimación a partir de los testigos únicamente.

Esta primera fase confirmó la reducida calidad del hormigón, al tiempo que permitió establecer una correlación entre las medidas de ultrasonidos y las resistencias del hormigón.

De hecho, la baja calidad del hormigón, con una muy elevada dispersión, aconsejaba analizar la totalidad de los soportes, de cara a identificar aquellos que pudieran presentar las peores resistencias. Además, la citada dispersión del hormigón hacía aconsejable ampliar el muestreo mediante probetas testigo a algunas zonas que inicialmente no fueron accesibles.

Por lo anterior, en una **segunda fase** (en realidad, ejecutada en varias etapas), se extrajeron 27 testigos adicionales y se realizaron medidas de ultrasonidos en la totalidad de los soportes.

Los nuevos testigos permitieron corroborar la calidad del hormigón obtenida en la primera fase, en tanto que las medidas de ultrasonidos confirmaron la existencia de ciertos pilares en los que la resistencia podría ser más baja de la exigida.

Con base en lo anterior, y dadas las incertidumbres ya comentadas sobre la correlación resistencia-velocidad de ultrasonidos, **en una tercera fase** en dichos pilares se extrajeron testigos para confirmar si, realmente, dichas resistencias eran tan bajas.

En los siguientes apartados detallamos los resultados de las diferentes fases de investigación llevadas a cabo.

## 4. Primera campaña de investigación

### 4.1. Tamaño del muestreo

El tamaño del muestreo está condicionado por el enfoque con el que se plantee la caracterización del hormigón. Para evaluar la resistencia de dicho hormigón en una estructura existente, existen, en principio, dos enfoques, ambos recogidos en la Norma UNE EN13791:2020 [1], de identificación y de caracterización.

El segundo enfoque es el único posible cuando, como era el caso, no había información sobre la calidad del hormigón, debiéndose obtener su resistencia característica a partir de los resultados obtenidos en testigos y/o ensayos no destructivos, teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la inferencia de la resistencia de la población a partir de un muestreo.

De cara a plantear el tamaño del muestreo, con este enfoque resultarían de aplicación los planes de muestreo recogidos en la Norma UNE-ISO 3951. *Procedimientos de muestreo para la inspección por variables* [3]. Como orden de magnitud, para tamaños de lote habituales en edificación, dicha norma recomienda tamaños de muestreo del orden del 5 %. Por ejemplo, para una población de 1000 pilares correspondería una muestra de 35.

Con dicho tamaño de muestreo y asumiéndose que todo el hormigón pertenezca a la misma población, se puede determinar la resistencia característica estimada del hormigón de dicha población<sup>1</sup>. Se trataría de una aproximación bayesiana, utilizando como

---

<sup>1</sup> La resistencia característica se puede estimar a partir de la media muestral  $\bar{x}$  y de la desviación estándar muestral  $s$ :

$f_{est} = \bar{x} - k \cdot s$ , teniendo en cuenta un parámetro  $k_p$  que depende del tamaño de la muestra (fijado, como se ha comentado anteriormente, a partir del tamaño del lote), del fractil-p estimado (típicamente el valor característico, es decir  $p = 0,05$ ) y del nivel de confianza deseado. Cabe destacar que los procedimientos bayesianos adoptados por el Eurocódigo conducen a resultados similares a los de la estadística clásica para un nivel de confianza del 75%.

información previa que no existen irregularidades en el suministro del hormigón.

En todo caso, a partir de los resultados de dicho muestreo se puede plantear cierta discretización de la población, reduciendo el tamaño de las regiones de prueba (por ejemplo, distinguiendo entre plantas o entre bloques separados por juntas de dilatación) lo que frecuentemente permite disminuir la dispersión de las muestras, mejorando en general la resistencia característica asignable a cada región de ensayo (a pesar de que aumentan las incertidumbres inherentes a la inferencia estadística por el menor tamaño de la población, penalizando a la resistencia característica estimada). Lo anterior, evidentemente, supone un menor tamaño de cada lote y, en consecuencia, del muestreo necesario en cada uno de ellos para mantener las probabilidades de aceptación en los mismos (esto es, que la resistencia característica en ello sea al menos la estimada), lo que hará necesario extraer testigos adicionales.

Con base en lo anterior, en el caso concreto del Mercado de Legazpi, para un tamaño de muestra de unos 1000 tramos de pilar y un nivel de inspección *Normal*, habrían sido necesarios, en principio, un mínimo de 35 tramos. Es por ello que se extrajeron 36 probetas testigo. Complementariamente, de cara a determinar si era posible cierta discriminación entre plantas o módulos así como para detectar ciertas anomalías en algunos tramos, se ensayaron, mediante ensayos no destructivos, hasta un total de 72 tramos, 36 de la planta baja y 36 de la planta primera y repartidos entre los 10 módulos que conforman la estructura. Nótese que considerándose una región de ensayo por cada módulo y planta -de unos 1000 m<sup>2</sup> cada una- resultan entre 3 y 4 puntos de ensayo por región (un punto de ensayo cada 280 m<sup>2</sup> aproximadamente, en el entorno que indicábamos anteriormente) que, si bien es insuficiente para asignar una resistencia característica a cada una de ellas con un nivel de

confianza suficiente, sí permite identificar posibles anomalías en alguna de las mismas, que debería estudiarse en fases posteriores. Insistimos no obstante en la dificultad de, en obras “antiguas”, realizar tal discretización, pues ni se dispone de información del ritmo de la obra, ni los medios de hormigonado eran los actuales. Sobre los resultados obtenidos en dichos ensayos y la caracterización del hormigón realizada se incide en los siguientes apartados.

#### **4.2. Resultados de los ensayos de probetas testigo de hormigón**

Como se ha descrito, en esta primera fase se extrajeron 36 probetas, 18 distribuidos en la planta baja y 18 de la planta superior. Estos 36 puntos de ensayo, juntamente con los 36 resultados que se dedujeran de los ensayos no destructivos que detallamos en el siguiente apartado, permitirían asignar una resistencia característica al hormigón de la estructura al tiempo que permitirían detectar posibles regiones de ensayo con ciertas anomalías.

El conjunto de resultados de las probetas testigo -corregidos por un factor 1,111<sup>(2)</sup>- oscilaron entre 7,7 MPa y 24,7 MPa, descartándose que existieran valores atípicos o estadísticamente aberrantes<sup>3</sup> y mostrando una gran dispersión. Dicha dispersión era especialmente elevada en los soportes de planta primera, si bien no se pudieron diferenciar zonas en el que el hormigón pudiera ser diferente al de las adyacentes.

Un análisis conjunto de todos los valores de resistencia a compresión y una única

---

<sup>2</sup> Dicho factor representa la corrección de la resistencia del testigo,  $f_{cis}$ , en relación con la resistencia a pie de obra, por daño y puesta en obra del hormigón, de acuerdo con el artículo 57.8 del Código Estructural. Otras normativas (ACI [4] o el futuro Eurocódigo, EN1992 actualmente en revisión [5], plantean valores análogos). Adicionalmente los resultados de las roturas de los testigos se corrigieron en función de la esbeltez de las probetas, obteniéndose la resistencia correspondiente a probetas de esbeltez 2 (lo que implica reducir el resultado cuando dicha esbeltez es menor).

<sup>3</sup> De acuerdo con la prueba de Dixon & Massey para un nivel de confianza del 95%.

población, da lugar a los parámetros que se muestran en la tabla 1, en la que también se muestran los que se deducirían de considerar una población por planta. También se muestra la resistencia característica in situ resultante,  $f_{ck}^{(4)}$ , suponiendo una distribución lognormal, según la ya citada norma UNE-EN 13791:2020 [1]:

**Tabla 1. Parámetros de la resistencia a compresión obtenida en probetas testigo (36)**

|                                            | Baja + 1ª | Baja | 1ª   |
|--------------------------------------------|-----------|------|------|
| Tamaño de la muestra, n                    | 36        | 18   | 18   |
| Resistencia media, $f_{cm}$ (MPa)          | 15,9      | 14,6 | 17,2 |
| Coefficiente de variación, $\delta$        | 0,26      | 0,30 | 0,19 |
| Resistencia característica, $f_{ck}$ (MPa) | 10,3      | 8,5  | 12,2 |

Si bien los valores medios de resistencias son reducidos y las dispersiones muy elevadas, se trata de valores acordes a la época en la que se construyó el edificio (véase la figura 1 al principio de la comunicación), y conducen a una resistencia característica estimada del hormigón del orden de 10 MPa. Nótese que, aunque no se podía diferenciar estadísticamente entre el hormigón de planta baja y planta primera, los resultados de esta última apuntaban a un hormigón algo mejor al de la planta inferior. No obstante, como primera aproximación, se adoptaron inicialmente los valores deducidos del conjunto de resultados.

### 4.3. Ensayos no destructivos

De entre las diferentes técnicas para estimar la resistencia a compresión de un elemento de hormigón evitando la extracción de un número elevado de testigos, una de las más empleada es la medida del impulso ultrasónico. De hecho, así se recomienda en [1] en su Anexo A (informativo) *Guía sobre cómo emprender una investigación*:

De la revisión de otros documentos de referencia (véase por ejemplo [6], [7] ó [8]) se deduce igualmente que en general es posible

utilizar los ultrasonidos para la estimación de la resistencia del hormigón, aunque siempre en combinación con la rotura de probetas testigo, y teniendo en cuenta los múltiples factores y dificultades que puede suponer la realización del ensayo, lo cual puede limitar su uso en algunos casos. La interpretación de los resultados debe ser en todo caso cuidadosa, no debiéndose esperar gran precisión en general (que será menor a medida que mejore la resistencia).

Es por ello que en la evaluación de la resistencia de estructuras existentes es frecuente que se trate de establecer una correlación entre dicha resistencia y las medidas de ultrasonidos.

Con base en lo anterior se determinó la velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos en 72 tramos de pilar, incluyendo los puntos de extracción de las probetas testigo. En todos ellos se realizaron medidas a media altura del pilar y en cabeza, de manera que los ensayos permitieran también analizar la posible variabilidad en altura de la resistencia del hormigón ya que, como hemos indicado, no era descartable que dentro de un mismo pilar existieran tongadas de peor calidad, especialmente en su tramo superior.

A modo de resumen en la tabla 2 se muestran los valores promedios y el coeficiente de variación de las velocidades medidas en ambas posiciones, así como de la cuarta potencia de las mismas (dado que, como se comenta en el siguiente apartado, la resistencia del hormigón es proporcional, aproximadamente, a dicha cuarta potencia).

**Tabla 2. Parámetros del conjunto de medidas de la velocidad del impulso ultrasónico**

|                                         | $v_{fuste}$<br>(km/s) | $v_{fuste}^4$ | $v_{cabeza}$ (km/s) | $v_{cabeza}^4$ |
|-----------------------------------------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------|
| Valor medio                             | 3,41                  | 139,7         | 3,45                | 144,0          |
| Coefficiente de variación, $\delta$ (%) | 8,1                   | 29,2          | 8,5                 | 35,1           |

<sup>4</sup> Los valores mostrados se refieren al hormigón a pie de obra, previamente a colocarse en la estructura. En este sentido, en el texto se diferencia entre dicha resistencia característica,  $f_{ck}$ , de la del hormigón en la propia estructura,  $f_{ck,ais}$  (*actual uniaxial in-situ concrete compressive strength in the structure*), de la que se deduciría del tratamiento de resultados de los propios testigos,  $f_{ck,is}$ .

De los resultados obtenidos y de los expuestos en dicha tabla 2 cabe destacar los siguientes aspectos:

- Por un lado, que muchas velocidades son *bajas*, si bien en términos medios serían *aceptables*. Por ejemplo, en [9] se recoge una tabla en la que se califica la calidad del hormigón fabricado con cemento portland en función de la velocidad de propagación de los ultrasonidos, asignando una calidad *mala* entre 2,1 km/s y 3,0 km/s, y *aceptable* entre 3,0 km/s y 3,6 km/s.
- Que las dispersiones de las velocidades, tanto a media altura como en cabeza, son, a diferencia de los resultados obtenidos en las probetas, relativamente reducidas (inferiores al 10 %). No obstante, a efectos de estimación de las resistencias, las dispersiones de las velocidades a la cuarta potencia (en el siguiente apartado indicamos por qué) presentan coeficientes de variación del orden del 30 %, del mismo orden que la deducida de las citadas probetas.
- A partir de dichas dispersiones se comprueba además que las medidas realizadas en cabeza y en fuste no son estadísticamente independientes. Además, analizando las diferencias de cada valor individual, el valor promedio de la misma es muy reducida (del 1,2 %, siendo ligeramente menores las de la cabeza).

Con base en lo anterior, cabe concluir que las medidas de los ultrasonidos son coherentes con los resultados de las roturas a compresión expuestas en el apartado anterior, siendo esperables resistencias relativamente bajas (en el entorno de los 10 MPa) en algunos tramos de pilar; al tiempo que no cabría esperar un hormigón peor en cabeza que en fuste.

#### 4.4. Correlación resistencia-ultrasonidos

Como ya se ha apuntado, la norma UNE EN 13791: 2020 [1], en su apartado 8.2.1 recoge cómo deben usarse los métodos indirectos (velocidad de ultrasonidos e índice de rebote) en combinación con la extracción de testigos. La Norma no especifica en cambio como realizar la regresión ni, en particular, especifica cuándo se puede considerar adecuada la misma. No obstante, en la Guía de aplicación de dicha Norma, se apunta a utilizar los *residuos estandarizados*, considerándose atípicos aquellos cuyo valor absoluto sea superior a 2,  $|r_i| \geq 2$ .

Con base en nuestra experiencia, 10 pares de valores para realizar dicha correlación son muy pocos, y de hecho, con tan reducido número de valores es frecuente, en estructuras antiguas donde la dispersión esperable de resultados y del propio hormigón es elevada, que no permita establecer dicha correlación en un nivel suficiente para poder otorgar unas resistencias a zonas ensayadas mediante la determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

Por otro lado, la velocidad del impulso ultrasónico depende de las propiedades elásticas del hormigón, por lo que la resistencia a compresión de un hormigón utilizando esta técnica está basada en la relación existente entre dicha velocidad y el módulo de elasticidad dinámico, que a su vez está relacionado con su resistencia a compresión, siendo en nuestra opinión adecuado considerar una regresión potencial  $f_c = v^4$  [10], , poniéndose de manifiesto que pequeñas variaciones de la velocidad tienen gran influencia en la resistencia. En todo caso, la precisión de los valores estimados debe considerarse con cautela, ya que la precisión esperable en obra suele considerarse del orden del 20 %, si bien dicha estimación suele quedar del lado de la seguridad (véase [10]).

Con base en lo anterior, considerando las 36 parejas de resultados, se estableció la correlación simple entre la resistencia a

compresión ( $f_c$ ) de las probetas testigo, y las cuartas potencias de las velocidades de propagación ( $V_p^4$ ). La curva obtenida,  $f_c = 0,0757 V_p^4 + 5,1$ , se considera como el lugar geométrico de las resistencias más probables del hormigón en cada punto en el que se ha obtenido la velocidad  $V_p$ . El coeficiente de correlación resultó de 0,755, pudiéndose calificar el ajuste como *bueno*<sup>5</sup>. Adicionalmente se comprobó que los *residuos estandarizados* cumplieran la condición  $|r_i| \geq 2$ .

Estudiada la correlación entre los resultados de los ensayos no destructivos y los del ensayo a compresión de las probetas testigo extraídas en pilares, se asignaron las resistencias individuales a cada tramo de pilar estudiado, ampliándose el tamaño de muestra inicial de 36 (sólo testigos) a 72 (testigos + ultrasonidos). Los parámetros de dicha muestra se muestran en la tabla 3, en la que se vuelven a diferenciar los ensayos realizados por planta y en la totalidad del Mercado.

**Tabla 3. Parámetros de la resistencia a compresión obtenida a partir de probetas testigo (36) y END (36)**

|                                                         | Baja + 1ª | Baja | 1ª   |
|---------------------------------------------------------|-----------|------|------|
| Tamaño de la muestra, n                                 | 72        | 36   | 36   |
| Resistencia media, $f_{cm}$ (MPa)                       | 14,8      | 14,1 | 15,4 |
| Coefficiente de variación, $\delta$                     | 0,24      | 0,27 | 0,21 |
| Resistencia característica, $f_{ck}$ (MPa) <sup>6</sup> | 10,2      | 8,4  | 12,1 |

Nótese nuevamente que, aunque no se puede diferenciar estadísticamente entre el hormigón de planta baja y planta primera, los resultados de esta última apuntaban a un hormigón algo mejor al de la planta inferior.

<sup>5</sup> Si bien la Norma UNE EN13791:2020 [1] no recoge un criterio para hacer dicha clasificación, la bibliografía suele calificar la bondad del ajuste a través del índice de correlación, en función del n° de muestras (parejas en este caso). Véase por ejemplo [11]. Así, para un tamaño de muestra igual a 15, el ajuste se clasificaría en función de dicho índice de correlación como *malo* ( $<0,514$ ), *estricto* ( $<0,590$ ), *suficiente* ( $<0,710$ ), *bueno* ( $<0,820$ ), *muy bueno* ( $<0,905$ ), o *excelente* ( $<0,950$ ). A medida que sube el tamaño, el índice de correlación para obtener una determinada clasificación baja.

<sup>6</sup> De acuerdo con apartado 8.2.2. de UNE EN13791:2020, cuya formulación incorpora las incertidumbres de la asignación de resistencias mediante ensayos no destructivos.

Los resultados obtenidos confirmaban la importante dispersión del hormigón así como la asignación de resistencias inicialmente realizada.

#### 4.5. Resistencia de cálculo estimada

Estimadas la resistencia característica, sería en principio inmediato obtener la resistencia de cálculo del hormigón sin más que dividirla por el coeficiente de minoración del material, normalmente  $\gamma_c=1,5$  a efectos de diseño. Sin embargo, en la evaluación de una estructura existente deben tenerse en cuenta las siguientes particularidades que impiden considerar directamente dicho coeficiente:

- En primer lugar, dicho coeficiente depende, entre otros aspectos, de su dispersión, que suele ser notablemente superior a la habitualmente utilizada para el tarado de dicho coeficiente de seguridad en estructuras nuevas (normalmente entre el 5 y el 10 %, frente al 26 % obtenido).
- También depende de los niveles de seguridad exigibles, que en las normas actuales se contempla mediante un índice de fiabilidad,  $\beta$ . En la evaluación de estructuras existentes es habitual considerar valores de dicho índice inferiores a los de diseño.
- Dado que la mayoría de normativa (por ejemplo el *Código Estructural* [12] o el futuro Eurocódigo EN1992 [5]) engloban tanto el efecto del daño en la extracción como el de la puesta en obra en un mismo coeficiente ( $k_{\mu fc}$  en el segundo de ellos), y además, los partes de ensayo habitualmente aportan directamente el valor de resistencia “a pie de obra” (teniendo en cuenta dicha corrección, normalmente del 10%, el factor 1,111 como se expuso anteriormente), obteniéndose así  $f_{ck}$ , es frecuente obtener la resistencia de cálculo  $f_{cd,ais}$  (normalmente representada simplemente como  $f_{cd}$ , al ser la única que interesa a

efectos de cálculo) a partir de dicha resistencia característica mediante su minoración por el coeficiente de seguridad correspondiente (que en este caso sí debe incorporar la puesta en obra).

Con dichas consideraciones, se actualizó el citado coeficiente de minoración del hormigón, obteniéndose  $\gamma_{ca}=1,44$  (y una resistencia de cálculo  $f_{cd}=7,1$  MPa). Nótese como el coeficiente de minoración obtenido resulta prácticamente coincidente con el que normalmente se emplea en obras nuevas, incluso a pesar de haberse considerado un índice de fiabilidad menor.

En relación con dicha dispersión cabe indicar por último que, dada la muy elevada dispersión de resultados obtenida en los ensayos de calidad del hormigón realizadas, era posible en nuestra opinión que existieran algunos tramos de pilar que, aun considerando la resistencia de cálculo obtenida en el párrafo anterior, que se encontraran en condiciones de seguridad no admisibles, por presentar resistencias aun más bajas. Es por ello por lo que adicionalmente se recomendó ampliar las campañas e investigación de cara a obtener información del 100 % de los soportes de la obra, recomendándose reforzar tanto aquellos que así se dedujera del cálculo como, en todo caso, los que presentaran resistencias inferiores a 8 MPa, dadas las incertidumbres que hormigones de tan baja calidad ofrecen tanto a efectos de durabilidad como por su regresión de resistencias con el tiempo.

## 5. Investigaciones complementarias

Dada la buena correlación obtenida entre las velocidades de ultrasonidos y resistencias a compresión, con base en las conclusiones obtenidas en la primera fase de investigación se llevó a cabo una nueva campaña de medidas de la velocidad del impulso ultrasónico que abarcó la totalidad de los soportes del Mercado (salvo alguno puntual que no resultó accesible).

De los casi 1000 tramos de soporte ensayados, en 58 de ellos se deducía una resistencia probable (esto es, la asignación que tiene una probabilidad de superarse del 50 %) inferior a la resistencia característica asociada a un nivel confianza del 95 %, de aproximadamente 10 MPa. Con las asignaciones correspondientes a un nivel de confianza del 95%, resultaban 41 soportes en la totalidad del mercado (frente a los aproximadamente 1000 tramos de soporte existentes) con valores inferiores a los 8 MPa referidos en el apartado anterior. No obstante, incluso en esos 41 soportes, era probable que las resistencias fueran algo mayores que las asignadas (de hecho, el valor probable sólo es menor que 8 MPa en 11 de ellos), por lo que se propuso analizar en detalle el hormigón de dichos soportes, efectuándose en ellos medidas de ultrasonidos a diferentes alturas por si pudieran existir tramos con una resistencia presumiblemente menor, para finalmente extraer en dichos tramos un testigo.

Actualmente dichas investigaciones sólo han podido realizarse en los bloques 1, 2 y 3, deduciéndose que únicamente un pilar tiene resistencia inferior a los 8 MPa establecido como límite.

## 6. Conclusiones

Con base en el caso práctico expuesto, cabe extraer las siguientes conclusiones en relación con la caracterización del hormigón de una estructura existente.

- La falta de información sobre la calidad del hormigón y sobre los ritmos de ejecución en estructuras existentes conduce, en la mayoría de los casos, a la necesidad de llevar a cabo muestreos de tamaños elevados para que la resistencia característica estimada sea fiable (en el caso habitual de soportes, del orden del 5 % de tramos).
- El muestreo es recomendable llevarlo a cabo mediante la extracción de probetas

testigo, dado que la interpretación de los resultados de los ensayos no destructivos es en general compleja y debe realizarse con mucha cautela.

- No obstante, en ocasiones puede combinarse dicha extracción de probetas testigo con ensayos no destructivos (sobre todo medidas de la velocidad de ultrasonidos), especialmente para identificar posibles diferencias entre regiones de ensayo o tramos que potencialmente puedan tener una calidad significativamente peor.
- En relación con lo anterior, para establecer la correlación entre los resultados de la rotura de testigos y las medidas de la propagación del impulso ultrasónico, suele ser necesario muestrear un número elevado de puntos, al menos 25. No obstante, en ocasiones, no es posible realizar una asignación de resistencias a partir de dicha correlación. En todo caso, los ultrasonidos aportan un índice de calidad cualitativo sobre la resistencia del hormigón, que puede guiar la investigación mediante testigos.
- La dispersión esperable en la resistencia del hormigón de estructuras antiguas (entendiendo por tales, en una primera aproximación, a las construidas antes de los años 80 del pasado siglo) es notablemente mayor que la considerada en diseño en las normativas actuales, lo que exige actualizar el coeficiente de minoración del hormigón para obtener su resistencia de cálculo, la que normalmente se utiliza en la evaluación.
- Todo lo anterior conduce a la necesidad, en muchos casos, de investigar la calidad del hormigón por fases, partiendo de información general sobre el conjunto de la obra, y llegando en fases posteriores a análisis de detalle, como se realizó en el ejemplo expuesto.

## Referencias

- [1] UNE EN13791:2020. *Evaluación de la resistencia a compresión in situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón*. AENOR, 2020 (Transcripción de la Norma europea EN 13791:2019. *Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components*. August 2019)
- [2] *Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*, EH-91. Ministerio de Fomento. España. Madrid, 1991.
- [3] UNE-ISO 3951. *Procedimientos de muestreo para la inspección por variables*. AENOR. Diciembre, 2012.
- [4] ACI Committee 214. 4-03. *Guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results*. American Concrete Institute. Farmington Hills, Mich., 2003, 16pp. 2013.
- [5] CEN/TC250. FprEN 1992-1-1 *Eurocode 2: Design of concrete structures -Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Febrero 2023.
- [6] FIB Bulletin 22: *Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures*. 2003 (traducido por ACHE en 2021, como Monografía 36).
- [7] FIB Bulletin 111: *Modelling of structural performance of existing structures*. 2024.
- [8] Monografía 33: *Evaluación de estructuras de hormigón armado*. ACHE, 2019.
- [9] *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*. FERNÁNDEZ CÁNOVAS, 1994. 15ª Ed.2009.
- [10] *Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón. Ensayos no destructivos y pruebas de carga*. INTEMAC, 2001.
- [11] Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. WALPOLE MAYERS. Pearson, 2012.
- [12] *Código Estructural*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Secretaría General Técnica. 2021.