Documento: **Eh-11**

UNIDAD CONSTRUCTIVA

INFORMACION COMPLEMENTARIA DEL HORMIGÓN. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

DESCRIPCIÓN

Procedimientos y métodos para la estimación de la resistencia a compresión del hormigón endurecido in situ.

ENSAYOS Y PRUEBAS

ÍNDICE DE REBOTE Y ULTRASONIDOS

ZONAS AFECTADAS

Cimentaciones y estructuras de hormigón armado.

Fig. 1: Índice de rebote. Esclerómetro Schmidt

Fig. 2: Equipo de ultrasonidos

INTRODUCCIÓN

Los ensayos de información complementaria del hormigón sólo son preceptivos en los casos previstos en el Código Estructural en el apartado 57.7, cuando lo contemple el pliego de condiciones técnicas particulares o cuando así lo exija la dirección facultativa

El Código Estructural, en su apartado 57.8 hace referencia a los ensayos de información complementaria del hormigón:

a) *La **rotura de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido** (UNE-EN 12390 -2 a 4:2020).*

Este ensayo no deberá realizarse cuando la extracción pueda afectar de un modo sensible a la capacidad resistente del elemento en estudio, hasta el punto de resultar un riesgo inaceptable. En estos casos puede estudiarse la posibilidad de realizar el apeo del elemento, previamente a la extracción.

b) *El empleo de **métodos no destructivos** fiables, como complemento de los anteriormente descritos y debidamente correlacionados con los mismos.*

Entre los **ensayos no destructivos** pueden considerarse los ensayos normalizados en UNE-EN 12504-2:2022 relativos a la determinación del **índice de rebote** y la UNE-EN 12504-4:2022, a la velocidad de propagación de **ultrasonidos**. La fiabilidad de sus resultados está condicionada, como indica el apartado b) anterior, a combinar estos ensayos con los resultados de los métodos indicados en el apartado a).

Estos métodos o ensayos no destructivos se realizarán como complemento y debidamente correlacionado con la rotura de probetas testigo de hormigón endurecido (UNE-EN 12390-3:2020).

Hay que tener presente la cantidad de factores que pueden influir en los resultados de los ensayos de información, como pueden ser: las características de los materiales constituyentes (áridos, cemento, aditivos,…), la dosificación del hormigón, densidad, porosidad, otras variables del hormigón endurecido (edad del hormigón, carbonatación, textura,…), tamaño, forma y estado tensional del elemento ensayado, sin olvidar las propias técnicas empleadas y procedimientos de ensayos, lo que puede originar una gran dispersión en los resultados obtenidos.

La planificación y realización de estos ensayos de información deberá estar a cargo de personal especializados.

ÍNDICE DE REBOTE. ENSAYO ESCLERÓMÉTRICO

El método de la determinación del índice de rebote de una zona o elemento de hormigón endurecido con ensayo esclerométrico puede utilizarse para:

- Determinar la uniformidad del hormigón in situ,
- Delimitar áreas o elementos de pobre calidad u hormigón deteriorado en estructuras.

Este método se basa en determinar la dureza superficial del elemento estructural a analizar, en este sentido, las recomendaciones de la RILEM (Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras), la profundidad del hormigón endurecido afectada oscila entre los 2 y 3 cm, dependiendo de factores como la resistencia del hormigón y el tipo de esclerómetro utilizado.

En todo momento se ha de controlar el adecuado funcionamiento del esclerómetro, realizando lecturas en el yunque de tarado, antes y después del ensayo, registrándolos y comparándolos entre ellos. Si los resultados difieren, el esclerómetro se limpiará y/o ajustará y se repetirán los ensayos. Los valores de índice de rebote, sobre el yunque de tarado, deben oscilar entre 78 y 82 (Esclerómetro modelo N).

Hay que tener presente aquellos cambios que puedan afectar a la ***superficie del hormigón***, como pueden ser la ***carbonatación, el grado de saturación o la textura*** de la zona ensayada, que pueden condicionar considerablemente los resultados obtenidos respecto a las propiedades del hormigón.

Por ejemplo, en la figura 3 se puede observar cómo influye la humedad en los valores de índice de rebote obtenidos, con la superficie húmeda o seca del elemento estructural analizado.

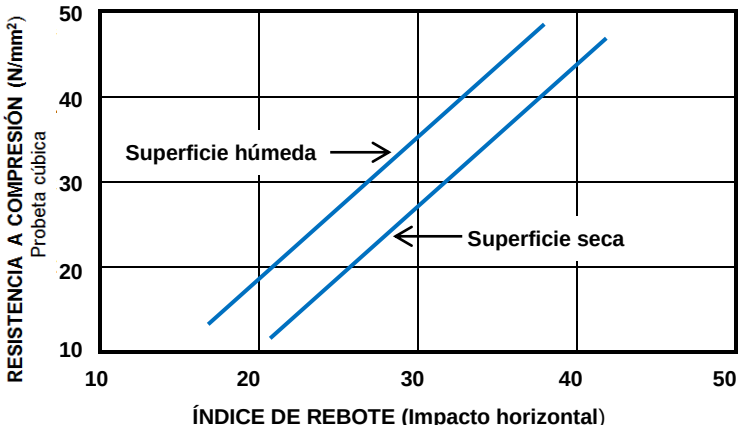

Fig. 3: Influencia de la humedad superficial (J. H. Bungey).

La norma UNE-EN-12504-2:2022 establece una serie de indicaciones para la toma de los valores de índice de rebote, como son, entre otras:

- *El elemento a ensayar tendrá un espesor mínimo de 100 mm y estar solidariamente fijo a una estructura.*
- *Las superficies texturadas en exceso, en presencia de polvo o con pérdida de mortero, se alisarán usando la piedra abrasiva, hasta que presenten un aspecto liso. Las superficies obtenidas con encofrados lisos o alisadas pueden ensayarse sin pulido.*
- *Lecturas en el yunque de tarado para asegurar que se encuentran dentro del rango recomendado por el fabricante.*
- *Se han de tomar, al menos, nueve lecturas con el fin de disponer de una estimación fiable del índice de rebote de la zona de ensayo, anotando la posición y orientación del esclerómetro.*
- *No se deben elegir dos puntos de impacto a una distancia inferior a 25 mm entre ellos, ni a 25 mm del borde de la pieza.*
- *Es recomendable dibujar una cuadrícula de líneas separadas entre 25 a 50 mm y tomar las intersecciones de las líneas como puntos de impacto.*
- *El resultado se tomará como la mediana (valor central, ordenados de mayor a menor o viceversa) de todas las lecturas corregidas, si es necesario, teniendo en cuenta la orientación del esclerómetro de acuerdo con las instrucciones del fabricante y expresado como un número entero.*
- *Si más del 20% de todas las lecturas difieren de la mediana en más de seis unidades, se descartarán la totalidad de las lecturas.*

En superficies húmedas, con resistencias similares, los valores del índice de rebote pueden ser hasta un 20% menor a los conseguidos con la superficie seca.

En cuanto a las probetas testigos de hormigón, destinadas a la obtención de calibraciones índice de rebote-resistencia, es aconsejable dejarlas 24 horas antes de su ensayo, en ambiente de laboratorio, teniendo presente las condiciones de humedad del hormigón, ya que la resistencia en seco es mayor que las probetas ensayadas en estado de saturación.

Por todo ello, la utilización del esclerómetro presenta una serie de restricciones, quedando limitado para la obtención de información comparativa, sobre todo, en estructuras nuevas y con un número elevado de elementos estructurales a chequear, debiendo enfocarse siempre con carácter orientativo.

❖ Estimación de la resistencia a compresión. Relación Índice Rebote-Resistencia

En el caso de su utilización para determinar ***la resistencia del hormigón colocado en la estructura,*** se han de ***relacionar los valores de dureza con las resistencias obtenidas en probetas testigos de hormigón***, para lo que se han de disponer de un número importante de puntos de correlación, para poder corregir con suficiente fiabilidad la curva de calibración del esclerómetro. Esto implica la realización de un número considerable de ensayos de probetas testigos de hormigón, en general 9 puntos de correlación y no menos de 6, siendo en la mayoría de los casos muy difícil de realizar y con costos elevados. (Ver: *"Determinación de la resistencia del hormigón mediante ensayos no destructivos realizados con esclerómetro y ultrasonidos, Adolfo Delibes. INTEMAC)". Informe de la construcción/388.*

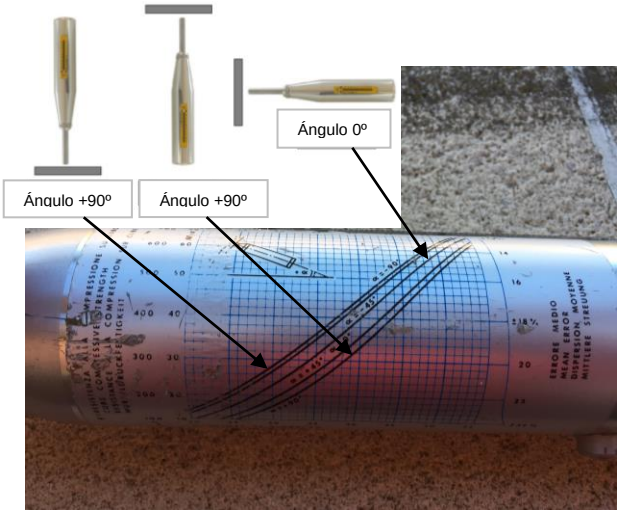

Fig. 4: Curva de calibración del esclerómetro Schmidt.

Fig. 5: Probetas testigos de hormigón

La correlación, entre los índices de rebote y la resistencia a compresión, debe definir siempre el intervalo de validez del ajuste obtenido y el error asociado a la estimación de resistencias, para un nivel de confianza del 95%.

Veamos, brevemente, un **ejemplo** de asignación de resistencias de regresión lineal Índice Esclerométrico-Resistencia a compresión de probetas testigos de hormigón.

Elementos analizados: Pilares (2 Plantas).
Probetas testigos: 9 (Amasadas diferentes y seleccionadas aleatoriamente).

Se realiza el ajuste por métodos utilizando la función correspondiente de una hoja de cálculo (en este caso Excel), obteniéndose:

Recta regresión: y = ax + b

$$\mathbf{y} = 15{,}1579\mathbf{x} - 222{,}529$$
$$R^2 = 0{,}9721$$

Siendo:

y e **x**	Las variables (Resistencia hormigón e I.E.)
a y b	Constantes de la recta de regresión.
R^2	Coeficiente de correlación

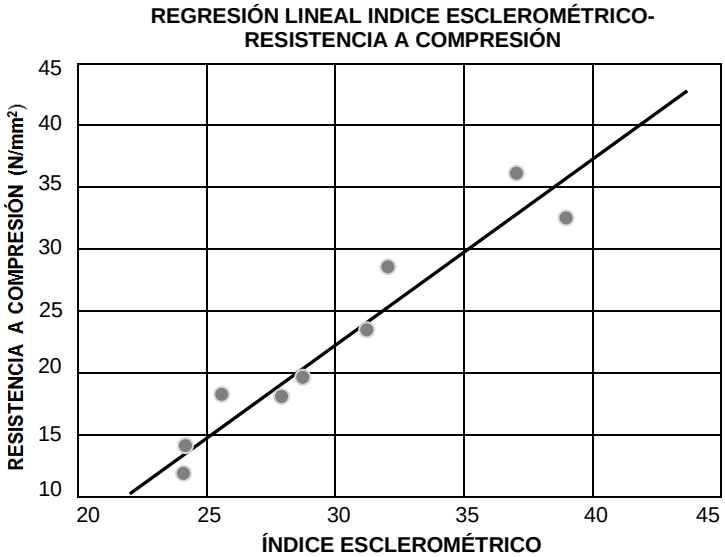

Fig. 6: Estimación resistencia compresión. Correlación testigos e índice esclerométrico

MEDIDA DE LA VELOCIDAD DEL IMPULSO ULTRASÓNICO (ULTRASONIDO)

Este ensayo consiste en medir el tiempo de recorrido de una onda ultrasónica por el interior del hormigón, entre un palpador emisor y un palpador receptor, ambos acoplados a la superficie del elemento de hormigón ensayado.

La frecuencia de los palpadores debería estar normalmente dentro del rango de 20 KHz a 150 KHz.

Este método puede utilizarse para la determinación de la uniformidad del hormigón, la presencia de fisuras, coqueras y otras irregularidades en el interior del elemento de hormigón objeto del chequeo, así como para estimar la resistencia de elementos de hormigón in situ o de probetas. Sin embargo, no se trata de una alternativa para la determinación directa de la resistencia compresión del hormigón.

Tiene la ventaja en relación con el ensayo esclerométrico, que la medida afecta a la masa completa del hormigón y no solo a la superficie exterior (2-3 cm) del elemento ensayado.

❖ Factores que influyen en las lecturas de la velocidad de ultrasonidos

Algunos de los factores que pueden influir en la velocidad de impulso ultrasónico, son:

- La dosificación de cemento, dosificación y tamaño máximo del árido, la relación agua/cemento y el tipo de hormigón empleado.
- Tipo y dimensiones del elemento estructural a ensayar.
- Contenido de humedad: la velocidad se incrementará a medida que aumente la humedad.
- Temperatura del hormigón: debe estar comprendido entre los 5º C y los 30º C. Fuera de este rango se deben de aplicar las correcciones correspondientes.
- Edad del hormigón: para un determinado valor de la velocidad de impulso ultrasónico, la resistencia del hormigón es superior para hormigones de mayor edad.
- La presencia de armaduras: la influencia es significativa si están en la dirección del impulso (en el acero puede ser hasta dos veces mayor que en el hormigón).
- La rugosidad de la superficie del elemento: cuando es muy rugosa y desigual, la zona debería alisarse y nivelarse por pulido o mediante una resina epoxi de endurecimiento rápido.
- La longitud del camino recorrido: se recomienda que sea al menos cinco veces mayor que el tamaño máximo del árido y no medir longitudes mayores a los tres metros.
- El contacto entre los palpadores con la superficie del hormigón: utilizar elementos de acoplamientos como la vaselina, jabón líquido, grasa, glicerina y pasta de caolín.
- La existencia de fisuras, grietas y coqueras: cuando un impulso encuentra una interfase hormigón-aire, se produce una obstrucción del haz ultrasónico siendo mayor el tiempo de tránsito.
- El estado tensional del elemento o zona ensayada: puede influir cuando se encuentre el elemento estructural sometido a niveles tensionales bastantes elevados, reduciendo la velocidad del impulso, motivada por la microfisuración interna del hormigón. (Según A. Delibes para cargas superiores al 65% de la rotura por compresión del hormigón del elemento analizado).

❖ Tipos de medidas y cálculo de la velocidad de impulso ultrasónico

Las medidas de velocidad de impulso se pueden efectuar situando los dos palpadores en caras opuestas (transmisión directa), en caras adyacentes (trasmisión semidirecta, por ejemplo, en esquinas de las estructuras), o en la misma cara (trasmisión indirecta o superficial, la menos sensible, utilizable solo cuando es accesible una cara del hormigón) de la estructura de hormigón o de la probeta.

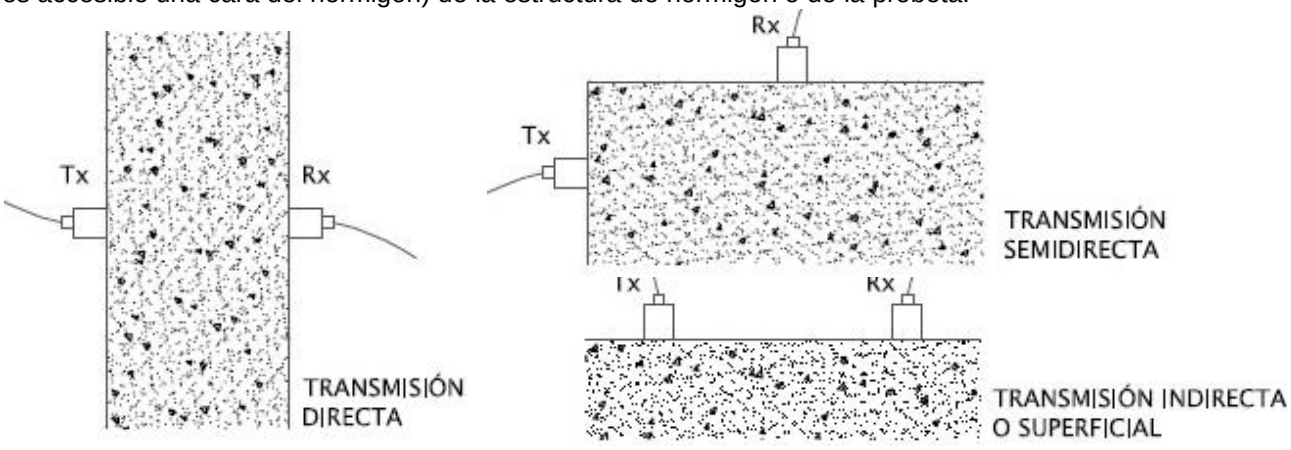

Fig. 7: Tipos de lecturas de velocidad de trasmisión del impulso ultrasónico

La velocidad del impulso en transmisiones directas y semidirectas se debe de calcular mediante la fórmula:

$$V = L/T$$

donde:

V es la velocidad de impulso en Km/s.
L la longitud de la trayectoria en mm
T es el tiempo que tarda el impulso en su trayectoria en microsegundos (µs).

Para determinar la velocidad del impulso por transmisión indirecta se han de seguir las indicaciones del Anexo A de la Norma UNE-EN 12504-2:2022, dada la incertidumbre de la longitud exacta de la trayectoria.

Cuando sea posible, se ha de evitar realizar medidas próximas a las barras del acero de armado, paralelas a la dirección de la propagación del impulso, y en su caso, los valores medios deberán ser corregidos, dependiendo de la distancia entre la línea del diámetro de la barra y la velocidad de propagación del hormigón situados en las inmediaciones de la armadura. Cuando la dirección de la velocidad de ultrasonidos es transversal a las armaduras, y la densidad de éstas es baja, en general, la influencia es mínima, por lo que no suelen afectarse por ningún tipo de corrección.

❖ Determinación de la profundidad y orientación de las fisuras en el hormigón

Para determinar la profundidad y la orientación de las fisuras en el hormigón se han de colocar los dos palpadores próximos a la fisura/grieta y mover alternativamente cada uno de ellos alejándolo de la misma y repitiendo los tiempos de paso correspondientes a cada posición.

La profundidad se determina mediante la expresión:

$$c = \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}}$$

donde:

C es la profundidad de la fisura/grieta.
X es la distancia de los palpadores a la grieta.
$\mathbf{t_1}$ el tiempo de propagación para x=150 mm.
$\mathbf{t_2}$ el tiempo de propagación para x=300 mm.

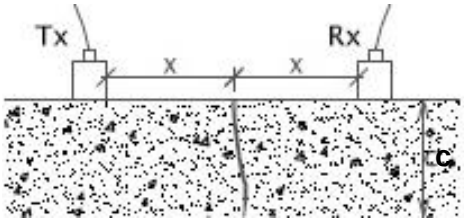

Fig. 8: Lectura de la profundidad de fisuras/grietas en el hormigón

Si se produce una disminución del tiempo medido, eso indica que la grieta se inclina en la dirección en la que el transductor se mueve (Fig. 9).

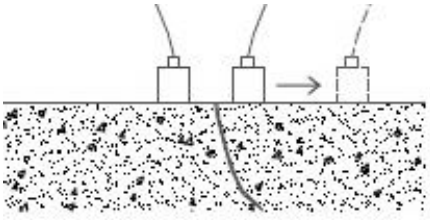

Fig. 9: Lectura de la orientación de fisuras/grietas en el hormigón

CORRELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDO Y TESTIGOS DE HORMIGÓN

En la bibliografía consultada, en cuanto a la correlación de resistencias reales de hormigón con la velocidad de propagación de ultrasonidos en estructuras de hormigón armado, la referencia localizada procede de la Comisión Permanente del Hormigón, en la que la correlación va dirigida solamente al concepto de la calidad del hormigón, sin aportar valores de resistencia del hormigón, como queda reflejado en la tabla siguiente:

VELOCIDAD PROPAGACION (m/seg)	CALIDAD DEL HORMIGÓN
> 4.500	EXCELENTE
3.500 a 4.500	BUENO
3.000 a 3.500	ACEPTABLE
2.000 a 3.000	DEFICIENTE
< 2.000	MUY DEFICIENTE

Tabla 1: Correlación velocidad de propagación de ultrasonido y la calidad del hormigón (Comisión permanente del Hormigón)

Es de gran interés el trabajo de investigación llevado a cabo, con relación a este tema, por el Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez (Tesis Doctoral. Universidad de Alicante), definiendo un procedimiento científico de análisis de los dos métodos de ensayos y de las herramientas necesarias (ensayos in situ: testigos y ultrasonidos, y ensayos de laboratorio: compresión simple de las probetas testigos), con el fin de realizar un completo chequeo estructural, para la obtención de los datos necesarios y su adecuada interpretación, con su nivel de confianza. Estos resultados pueden suponer el soporte básico para el futuro análisis de la seguridad estructural, y que servirá de base para la redacción del correspondiente proyecto de intervención estructural (reparación, refuerzo, demolición, etc.), sin perder de vista la responsabilidad que conlleva.

Parte de cuatro tipos de estructuras, dependiendo de la distancia a la costa y de más o menos 20 años, proponiendo la fórmula de **correlación** para cada una de ellas:

Edificio con **estructuras tipo A:** Menos de 500 m de la costa y menos de 20 años:

$$\text{Resistencia} = 26{,}622 - 0{,}022 * \text{Velocidad} + 0{,}000005557 * \text{Velocidad}^2$$

Edificio con **estructuras tipo B**: Menos de 500 m de la costa y más de 20 años.

$$\text{Resistencia} = 47{,}568 - 0{,}027 * \text{Velocidad} + 0{,}00000516 * \text{Velocidad}^2$$

Edificio con **estructuras tipo C**: Más de 500 m de la costa y menos de 20 años.

$$\text{Resistencia} = -34{,}709 + 0{,}023 * \text{Velocidad} + 0{,}00000175 * \text{Velocidad}^2$$

Edificio con **estructuras tipo D:** Más de 500 m de la costa y más de 20 años.

$$\text{Resistencia} = 100{,}787 - 0{,}071 * \text{Velocidad} + 0{,}0000131 * \text{Velocidad}^2$$

A continuación, se exponen las ***gráficas-curvas de regresión cuadrática***, para los modelos de los tipos de estructuras analizadas (tipos A, B, C y D), presente en dicha investigación, con los que se pueden obtener ***valores de resistencia media (R) del hormigón*** del elemento a analizar, en función de la velocidad de impulso ultrasónicos (V).

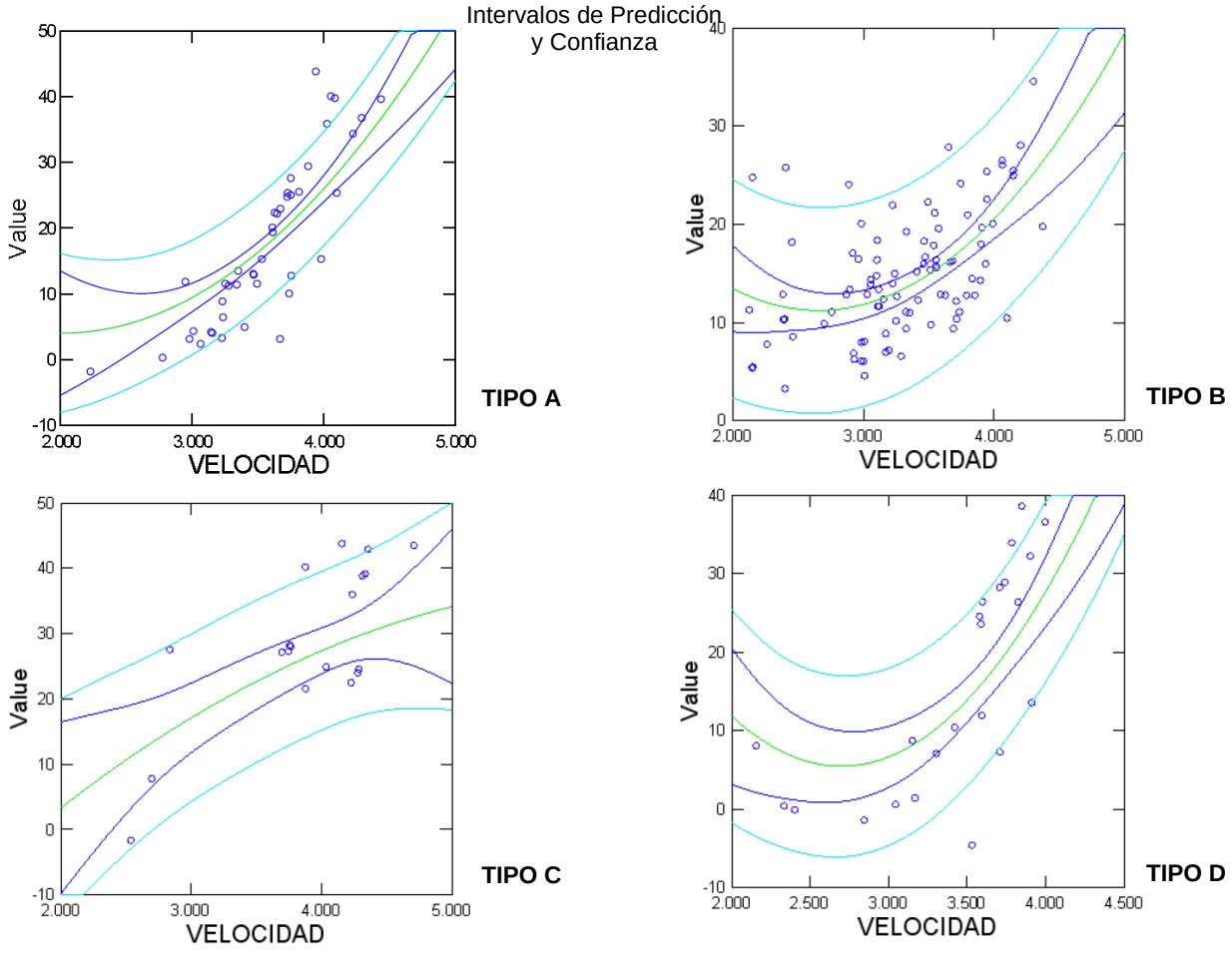

Fig.10: Gráficas correlación-regresión cuadrática para obtener valores de resistencia media del hormigón en función de la velocidad de propagación de ultrasonidos (Jesús H. Alcañiz Martínez).

Asimismo, expone una tabla final, como futura propuesta normativa, con los valores de resistencia media, para el total de estructuras chequeadas y para cada uno de los distintos tipos de edificios:

PROPUESTA DE CORRELACIÓN DE RESULTADOS (Con Velocidad ultrasonidos y Resistencia)					
VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/seg)	RESISTENCIA MEDIAS (N/mm²) (Valor esperado)				
	TODAS LAS ESTRUCTURAS	A	B	C	D
4.500	34	40	32	33	47
4.000	23	28	23	29	26
3.500	16	18	17	24	13
3.000	11	11	14	19	6
2.500	10	6	13	12	5
2.000	(*)	(*)	(*)	4	(*)
< 2.000	(*)	(*)	(*)	< 4	(*)
(*) Valores no congruentes obtenidos de la fórmula de Regresión Cuadrática					

Tabla 2: Propuesta correlación resultados velocidad-resistencia para cada tipo de edificio según distancia a la costa y edad (Jesús H. Alcañiz Martínez)

Por último, hay que recordar que la utilización de los métodos de ensayos no destructivos (reconocimiento esclerométrico y auscultación ultrasónica), para obtener la resistencia a compresión del hormigón, en el chequeo de elementos estructurales, deberán correlacionarse, independientemente o combinadas, con los resultados de las probetas testigos del hormigón in situ. Siendo muy probable que se utilicen para la posterior evaluación de la estructura objeto de análisis, con la que se tomarán las decisiones y propuestas de actuación (reparaciones, refuerzos, demolición, etc.), que se recogerán en el correspondiente proyecto de intervención estructural, sin perder de vista, las responsabilidades que de ello se puedan derivar.

La norma UNE-EN13791:2020 indica, igualmente que cuando se ensaya con métodos no destructivos (END) se mide una propiedad distinta a la resistencia, por tanto, es necesario emplear una relación entre los resultados de los END y la resistencia a compresión de testigos.
Dicha norma ofrece dos formas de calibración (mediante correlación estadística o mediante el uso de una curva básica y ajuste), pero requiere una serie de pares de resultados de probetas testigos y ensayo no destructivo, con un mínimo de 9 pares, que a menudo parece ser demasiado grande en la práctica. Además, por razones económicas, el número de pares de resultados utilizados in situ para la calibración suele ser pequeño (en muchos casos 3 pares), en general, muy por debajo de lo recomendado en la Norma.

Estos ensayos se han de realizar por Laboratorios de Control de Calidad debidamente acreditados. (Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación). Se debe contar con personal cualificado, con conocimientos del proceso de ensayo, análisis estadísticos, trazabilidad, análisis comparativos e interpretación de los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

FUNDACIÓN MUSAAT

AUTOR
● Alberto Moreno Cansado

COLABORADOR
● Manuel Jesús Carretero Ayuso

Calle del Jazmín, 66.
28033 Madrid

www.fundacionmusaat.musaat.es

IMÁGENES
● Moreno Cansado, Alberto. Fig.1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9
● Bungey, J. H. Fig.3
● Alcañiz Martínez, Jesús H. Fig.10

BIBLIOGRAFÍA y NORMATIVA
● Código Estructural. Real Decreto 470/2021 ● Normas UNE EN 12504-1-2 y 4:2022, UNE-EN 13791:2020. ● Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón. INTEMAC, ● CSTR Nº 11 (Concrete Society Technical Report) Concrete core testing for strength. ● Chequeo de estructuras de hormigón armado: análisis de la relación de resultados de probetas testigos y ultrasonidos. Jesús H. Alcañiz Martínez. Universidad Alicante.

CONTROL: ISSN: 2340-7573 Data: 16/4 Ord.: 10 Vol.: E Nº: Eh-11 Ver.: 2 Mod.08/23

NOTA: Los conceptos, datos y recomendaciones incluidas en este documento son de carácter orientativo y están pensados para ser ilustrativos desde el punto de vista divulgativo, fundamentados desde una perspectiva teórica, así como redactados desde la experiencia propia en procesos patológicos.

© del Autor
© de esta publicación, Fundación MUSAAT

Nota:
En este documento se incluyen textos de la normativa vigente