

ANTIGUAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.
INVESTIGACIÓN – PERITACIÓN, EN FUNCIÓN DE SU EDAD

ALCAÑIZ MARTÍNEZ, JESÚS. H.¹; SÁNCHEZ MEDRANO, FRANCISCO. J.²;
GALIANA AGULLÓ, MERCEDES³; LASHERAS ESTRELLA, ANA⁴

1: Escuela Politécnica Superior

*UCAM (Universidad Católica San Antonio de Murcia)
e-mail: jalcaniz@ucam.edu, web: <http://www.ucam.edu>*

2: Escuela Politécnica Superior

*UCAM (Universidad Católica San Antonio de Murcia)
e-mail: fjsanchez@ucam.edu, web: <http://www.ucam.edu>*

3: Escuela Politécnica Superior

*UCAM (Universidad Católica San Antonio de Murcia)
e-mail: mgaliana@ucam.edu, web: <http://www.ucam.edu>*

4: Escuela Politécnica Superior

*UCAM (Universidad Católica San Antonio de Murcia)
e-mail: alasheras@ucam.edu, web: <http://www.ucam.edu>*

Palabras clave: hormigón armado; estructuras; velocidad de ultrasonidos; probetas testigo; resistencia a compresión.

RESUMEN

Hasta ahora, gran parte de las investigaciones llevadas a cabo para la estimación de las resistencias a compresión de los elementos de hormigón armado de nuestras estructuras, se han realizado en base a chequeos con extracción de un gran número de probetas testigo. Mediante la presente investigación se estudian 185 casos reales de elementos estructurales de hormigón armado, mediante un chequeo basado en la correlación de resultados entre la Velocidad de Ultrasonidos (V) y la Resistencia a Compresión (R). El estudio se desarrolla teniendo en cuenta la edad de las estructuras. Posteriormente se realiza un análisis estadístico con los datos obtenidos y con ellos se ha definido un claro procedimiento científico de análisis de los dos métodos de ensayo y de las herramientas necesarias para realizar un completo chequeo estructural, correlación de resultados, que

se propone como aportación para completar la actual normativa y facilitar los procedimientos de peritación estructural, así como para el análisis de antiguas estructuras de hormigón, como objetivo principal de este artículo.

1. INTRODUCCIÓN

Es ya conocido que a través del análisis mediante Ultrasonidos se detectan posibles discontinuidades tanto superficiales como internas presentes en el material inspeccionado [1]. Para su interpretación se tiene en cuenta que los valores más altos de velocidad, determinan una mayor densidad y compacidad del material [2]. Mediante el ensayo de Compresión Simple se determina la resistencia real del hormigón. Con ambos métodos se aplica la técnica de chequeo estructural basada en la correlación de resultados entre ellos.

En esta investigación se ha realizado un estudio profundo de los resultados obtenidos con los métodos existentes para el chequeo de estructuras de hormigón armado. Se pretende con ello profundizar en el conocimiento científico técnico de las herramientas existentes para realizar una evaluación estructural fiable. A partir de los resultados obtenidos se han definido los modelos matemáticos que relacionan ambos ensayos, así como los diagramas, rectas y curvas de regresión que permitan acercarse con la máxima confianza a los valores verdaderos de (R) según las lecturas de (V).

2. ESTADO DEL ARTE

Para encuadrar el estado de la cuestión, se debe recordar la normativa en vigor [3], destacando las especificaciones de la instrucción técnica [4] en lo relativo a la durabilidad – vida útil de la estructura (relacionada con la edad), que son las variables estudiadas en esta investigación.

Por otra parte, el origen de las técnicas y métodos de investigación en chequeo de estructuras en España hay que datarlo en los primeros años de la década de los sesenta, paralelamente al proceso de redacción y publicación de la primera norma española de hormigón armado y en masa: la Instrucción de Hormigón [3], seguida de los dos dígitos correspondientes al año de su publicación.

Se puede afirmar también que, no existen referencias de datos ordenados sobre la interpretación de la correlación de resultados de estas dos técnicas de ensayo (Probetas Testigo y Velocidad de Ultrasonidos) en estructuras de hormigón armado.

En esa línea, consultada la bibliografía editada en lengua extranjera, a la que se ha tenido acceso, sobre experiencias en otros países de nuestro entorno, no se encuentran estudios en profundidad de correlación de resultados, con las variables estudiadas, aunque sí existe alguna bibliografía [5] que analiza los resultados obtenidos de estos ensayos, manejando otras variables, como los distintos tamaños de probetas, tipología de los áridos, tratamientos de curado, la aplicación de los fundamentos teóricos del ensayo de ultrasonidos y los resultados de algunas correlaciones, manejando estas mismas variables, pero desde luego, sin la profundidad y amplitud de información con la que se ha trabajado en esta investigación.

Con respecto a la correlación entre los resultados obtenidos por los dos métodos de ensayo planteados (Testigos/Ultrasonidos), se recoge una orientación de resultados,

para evaluar la “calidad del hormigón”, en función exclusivamente de los resultados de velocidad de ultrasonidos.

Son muchos los factores que influyen en la realización y desarrollo de todo el proceso (desde la tipología–calidad del material de partida, dosificación inicial del hormigón, tipología de los áridos, porosidad, densidad y otras variables del hormigón endurecido, hasta las propias técnicas y procedimientos de ensayo), lo que genera una gran posibilidad de dispersión en los resultados, cuya traducción a la simplicidad de los datos que se exponen en estas tablas y su gran carga de subjetividad, hacen dudosa su interpretación, corriéndose un gran riesgo en su uso y aplicación concreta en actuaciones - evaluaciones estructurales, por las dudosas conclusiones a las que se puede llegar.

Para finalizar, en cuanto al estado del arte, es conocido que no existe una relación matemática entre la resistencia del hormigón y la velocidad de propagación, sino que hay que establecer la más adecuada correlación, adaptada a cada uno de los casos y de una forma más científica. Por ello, se entiende y se justifica sin duda alguna, en este artículo, que se obtienen resultados finales mucho más ciertos y mucho más fiables, con el uso de las tablas que se presentan, lo que facilitará sin duda, la interpretación de resultados en la realización de peritaciones – estudios de seguridad estructural de casos reales de estructuras ya ejecutadas, que puedan plantearse en el futuro.

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se ha trabajado con datos obtenidos exclusivamente de estructuras reales de hormigón armado, procedentes de obras situadas en el arco mediterráneo. Con el objetivo de simplificar la nomenclatura utilizada para la identificación de los edificios, se han clasificado las estructuras analizadas distinguiendo su edad (más o menos de 20 años) (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Nomenclatura para la identificación de las estructuras estudiadas (Aportación de los autores).

Edad (años)
E1: < 20
E2: > 20

Tabla 2. Clasificación de los tipos de estructuras en función de los parámetros (Aportación de los autores).

Tipo de estructura	Edad
A	E1
B	E2
C	E1
D	E2

En cuanto a las condiciones de ensayo, se ha llevado a cabo el análisis “in situ” mediante Ultrasonidos (Ultrasonic Tester) (según norma UNE-EN 12504-4 de 2006), en diferentes estructuras de hormigón armado, obteniéndose más de 2.000 datos de Velocidad de Propagación, con los que se trabajó en el análisis estadístico.

De igual modo se ha realizado la extracción de probetas testigos, para su posterior análisis en laboratorio, mediante el ensayo de compresión simple (según norma UNE-EN 12504-1 de 2009), obteniéndose 185 valores de Resistencia (se eliminaron 5 valores “outlier” y se trabajó con 180 unidades).

De cara a discriminar el estudio, la localización de ultrasonidos y probetas testigo, se realizó por las obras analizadas, a lo largo de la geografía en la banda mediterránea. Por razones de espacio no se detalla la situación de cada una de las obras que quedan perfectamente identificadas en la correspondiente toma de datos, que es objeto de otra investigación paralela. Es importante señalar que cada uno de los valores de probetas testigo lleva asociado un valor único de velocidad de ultrasonidos.



Figura 1. Proceso de análisis de ultrasonidos (izquierda). Momento de extracción de una probeta testigo (derecha). (Fuente: Los autores).

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para el desarrollo de la investigación, se efectuó el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos. También se ha realizado la discusión de los resultados y han sido cotejados con otros resultados de distintos procesos de ensayos en estructuras existentes, como análisis previo, en el estado del arte.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente tabla se muestran de manera resumida, los resultados obtenidos del proceso de investigación, para los valores de Resistencia a Compresión (R), medidos en N/mm^2 y de Velocidad de Ultrasonidos (V), en m/s.

Tabla 3. Valores descriptivos tras el primer tratamiento de los datos [6].

VALORES DESCRIPTIVOS							
Muestra (Subpoblaciones)	Nº de valores	Media		Mediana (Cuartil 2)		Desviación típica	
VARIABLES MEDIDAS (R y V)		R	V	R	V	R	V
Global (Totales)	180	16,93	3.441	15,40	3.535	7,92	548
Edad 1 (E1)	62	20,58	3.656	21,55	3.729	8,84	510
Edad 2 (E2)	118	15,01	3.329	14,00	3.416	6,69	535

Estos valores analizados para los 180 elementos estudiados, se obtienen tras la eliminación de los distintos valores extremos. De esta forma no se afecta la muestra original de los datos disponibles, consiguiéndose una gran fiabilidad en el resultado a discutir [7]. De los resultados obtenidos se interpreta que:

- Los valores medios de resistencia para los subgrupos de edad 1 ($R = 20,58 \text{ N/mm}^2$), son los más altos, por encima de la media global ($R = 16,93 \text{ N/mm}^2$).
- Los mismos valores de los subgrupos de Edad 2 ($R = 15,01 \text{ N/mm}^2$), están por debajo de la citada media global ($R = 16,93 \text{ N/mm}^2$).
- Las mismas situaciones se reproducen en los valores de velocidades (V).
- En cuanto a la mediana (cuartil 2 – 50% de los casos – valores), se repite la situación de forma mimética.
- Respecto a la desviación típica obtenida, en todos los casos aparecen valores muy cercanos, tanto en resistencia como en velocidad, lo que confirma la escasa dispersión de los valores obtenidos.
- Los valores medios de resistencia para la Edad 1 ($R = 20,58 \text{ N/mm}^2$) están por debajo de las limitaciones normativas actuales, mínimas en un HA-25 (EHE-08), pero por encima de los valores mínimos normativos fijados en 175 Kp/cm^2 ($17,5 \text{ N/mm}^2$), en anteriores Instrucciones del Hormigón.
- Los valores medios de resistencia para la Edad 2 ($R = 15,01 \text{ N/mm}^2$) están muy por debajo de las exigencias normativas actuales y por debajo de las anteriores prescripciones de $R=17,5 \text{ N/mm}^2$ (mínimo en estructuras de hormigón armado).

Se han obtenido las correlaciones (r) entre los valores de Resistencia (R) y de Velocidad (V), que se identifican en la siguiente tabla:

Tabla 4. Fiabilidad de las correlaciones [6].

Muestra	r	p-valor
Global (Todas las estructuras)	0,677	0.0000
Edad 1 (E1)	0,833	0.0000
Edad 2 (E2)	0,608	0.0000
Localización 1 (L1)	0,616	0.0000
Localización 2 (L2)	0,773	0.0000

Dado el p-valor (0.000) en todos los casos, se confirma la existencia de una correlación positiva (a más velocidad, más resistencia) y significativa, por lo que no corresponde a fenómenos debidos al azar [7]. Dado que cuanto mayor sea el valor de r, mejor es el ajuste de la correlación, se confirma que es más fiable la correlación de R y V en edificios de Edad 1 (E1), que corresponde a edificios de menor edad (identificados con edificios del tipo “C”). Y es menor la confianza en edificios con estructura de hormigón de mayor edad (Edad 2) (edificios tipo “B”).

En todos los casos queda de manifiesto que la regresión cuadrática es más fiable que la regresión lineal, dado que el coeficiente de “poder explicativo” (R²) es mayor en todos los casos, respecto a la regresión lineal, para cada una de las sub-poblaciones estudiadas [8]. Teniendo en cuenta lo expuesto en la bibliografía consultada, se plantean otras alternativas, en función de los resultados de esta investigación. En ese sentido, como se ha podido constatar, en la bibliografía nacional [9] e internacional [3], aparece una tabla (Tabla 5) de valores tipo de correlación de resultados, para la “clasificación de la calidad del hormigón” en función de los valores de Velocidad de Propagación de Ultrasonidos (como se ve, no se contemplan valores de resistencia a compresión), lo que introduce un claro factor de “subjetividad” inadecuado en este tipo de trabajos de investigación.

Tabla 5. Clasificación de Calidad del Hormigón [9].

VELOCIDAD PROPAGACIÓN (m/s)	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

Como aportación de este trabajo de investigación y de cara a una futura propuesta normativa, se complementa la Tabla 5 y se incorporan los valores estimados de resistencias medias (R) que se pueden obtener, en función de las velocidades ultrasónicas dadas (V), para cada tipología de estructura a ensayar, con las variables de edad 1 y 2 (E1 y E2) correspondiente a edificios de más o de menos de 20 años de edad (Tabla 6).

Tabla 6. Propuesta definitiva de clasificación del hormigón [6].

PROPUESTA DE CLASIFICACIÓN CALIDAD DEL HORMIGÓN TABLA DE CORRELACIÓN DE RESULTADOS (Con Velocidad y Resistencia)					
VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/s)	CALIDAD DEL HORMIGÓN (**)	RESISTENCIAS MEDIAS (N/mm ²) (Valor esperado)			
		A	B	C	D
> 4.500	EXCELENTE	> 40	> 32	> 33	> 47
4.000 – 4.500	MUY BUENO	28 - 40	23 - 32	29 - 33	26 - 47
3.500 – 4.000	BUENO	18 - 28	17 - 23	24 - 29	13 - 26
3.000 – 3.500	ACEPTABLE	11 - 18	14 - 17	19 - 24	6 - 13
2.500 – 3.000	DUDOSO	6 - 11	13 - 14	12 - 19	5 - 6
2.000 – 2.500	DEFICIENTE	5 - 6(*)	15 - 13(*)	4 - 12	11 - 5 (*)
< 2.000	MUY DEFICIENTE	< 5(*)	< 15(*)	< 4	< 11 (*)

(*) Valores no congruentes obtenidos de la fórmula de Regresión Cuadrática.

(**) Denominación de la Calidad del Hormigón, en distinta escala, para cada tipología de estructura (A, B, C o D).

5. CONCLUSIONES

A continuación se detallan las conclusiones que se derivan de esta investigación, que pueden ser de aplicación directa a los procesos de chequeos estructurales, de especial aplicación en antiguas estructuras existentes.

Se puede afirmar que con este trabajo de investigación, se ha definido un claro procedimiento científico de análisis de los dos métodos de ensayo y de las herramientas necesarias para realizar un completo chequeo estructural, para la obtención de los datos necesarios y su adecuada interpretación, facilitando información suficiente para realizar un análisis crítico de cómo se efectúan, de su alcance y fundamentalmente de su fiabilidad – nivel de confianza, dado que, sus resultados van a suponer el soporte básico para el futuro análisis - diagnóstico – evaluación de seguridad – peritación estructural y finalmente, la redacción del correspondiente proyecto de intervención estructural (refuerzo, reparación, demolición, en antiguas estructuras, etc.).

Los resultados obtenidos en la investigación facilitan la toma de decisiones en la evaluación de la seguridad estructural del elemento de hormigón armado, ya que ponen de manifiesto que la técnica de chequeo estructural y los sistemas de correlación de datos planteados, pueden ser considerados como una herramienta totalmente fiable en la evaluación estructural, dado que los resultados de las correlaciones nos confirman su aptitud para el uso a que se destinan, pudiendo proporcionar resultados fiables en una evaluación – peritación estructural, para cualquier estructura antigua de hormigón armado.

En cuanto a los valores de (R) y (V) obtenidos, se confirma la existencia de una clara diferencia entre los valores de Resistencia (R) y de Velocidad (V) en las estructuras de

edificios de menos y más de 20 años de edad, (E1 y E2 respectivamente), quedando demostradas la mayor calidad del hormigón y las correlaciones más fiables en las estructuras de los edificios más jóvenes, lo que nos confirma que en edificios de estructura antigua debemos disponer de más información, para objetivizar resultados y mejorar la fiabilidad de su interpretación.

Mediante el análisis estadístico, se confirma su gran fiabilidad y especialmente las correlaciones cuadráticas, para las distintas circunstancias estudiadas, pudiendo ser directamente aplicadas, según los casos, para cualquier chequeo estructural en edificios antiguos existentes. Se ratifica que el sistema de correlación al que se ha llegado en este proceso de investigación, es totalmente fiable para estructuras de hormigón armado, en cualquier estado de conservación y con las citadas variables de edad de más o de menos de veinte años (E1 y E2).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Henry J.L. (2009). Optimización del control de la resistencia de hormigones endurecidos mediante ultrasonidos. UPB.
- [2] Facaoaru I. and Lugnani C. E & FN Spon. (1993). Contributions to the diagnosis of stone and concrete historical structures using non-destructive techniques.
- [3] New European Standards for Concrete, especialmente en las UK, EN 206: Concrete specifying y en la British Standard BS – 8500. Norma Deutschen Betonnormen Din 1045. British Standard – BS. Regles Bael 99: Techniques et Constructions en Beton Armé. American Concrete Institut (ACI).
- [4] Instrucción de Hormigón estructural. EHE-08.
- [5] Bishr, H.A.M. (1995). Assessment Of concrete compressive strength using the lock test. Construction and Building Materials.
- [6] Alcañiz Martínez, J.H. (2011). Chequeo de Estructuras de Hormigón Armado: Análisis de la relación de resultados de probetas testigo ultrasonidos. (Tesis Doctoral). Universidad de Alicante, España.
- [7] Chambers, J.M., Cleveland, W.S., Kleiner, B., and Tukey, P.A. (1983). Graphical methods for data analysis. *Duxbury Press, Boston, MA*.
- [8] Belsley, D.A. Kuh, E. and WELSCH, R.E. (1980). Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity. *New York, NY*.
- [9] Comisión Permanente del Hormigón (CPH). Real Decreto 996/1999, de 11 de junio.