

CHEQUEO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Análisis de resultados de probetas testigo y ultrasonidos. Resultados del proceso de investigación

Alcañiz Martínez, J.H. ^{1*}; Louis Cereceda, M. ²; Sánchez Medrano, F. J.¹; Lasheras Estrella, A. ¹

¹ Escuela Politécnica. Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM)

² Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alicante

jalcaniz@ucam.edu

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 gran número de probetas testigo, extraídas de esos elementos.

Mediante la presente investigación se estudian 185 casos reales de elementos estructurales de hormigón armado, mediante un chequeo estructural 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 localización de la construcción respecto a la costa marina y la edad de la propia estructura. Posteriormente se realiza un análisis estadístico con los datos obtenidos con este trabajo se ha conseguido un claro procedimiento científico de análisis de los dos métodos de ensayo y de las herramientas necesarias para realizar un completo chequeo estructural, correlación entre ellos y lo más novedoso del proceso, la confección de fórmulas matemáticas y las gráficas de correlación, que ponen de manifiesto la efectividad del procedimiento, que se propone como aportación para normativa.

Palabras clave: hormigón armado; estructura; Velocidad de Ultrasonidos; Resistencia a Compresión.

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 (HENRY, 2009). Para su interpretación se tiene en cuenta que los valores más altos de velocidad, determinan una mayor densidad y compacidad del material (FACAOARU, y LUGNANI, 1993). 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 relacionen 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. 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) y su localización geográfica (a más o menos de 500 m de la costa). (Tablas 1 y 2).

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

Localización (m)	Edad (años)
L1: < 500	E1: < 20
L2: > 500	E2: > 20

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

Tipo de estructura	Distancia a la costa	Edad
A	L1	E1
B	L1	E2
C	L2	E1
D	L2	E2

Se ha llevado a cabo el análisis “in situ” mediante Ultrasonidos (Ultrasonic Tester), en diferentes estructuras de hormigón armado, obteniéndose más de 2000 datos de Velocidad de Propagación, con los que se trabajó en el análisis estadístico.



Figura 1: Ultrasonic Tester (izquierda). Análisis “in situ” mediante Ultrasonidos (derecha).

De igual modo se ha realizado la extracción de probetas testigo, para su posterior análisis en laboratorio, mediante el ensayo de compresión simple, obteniéndose 185 valores de Resistencia (se eliminaron 5 valores “outlier” y se trabajó con 180 unidades).

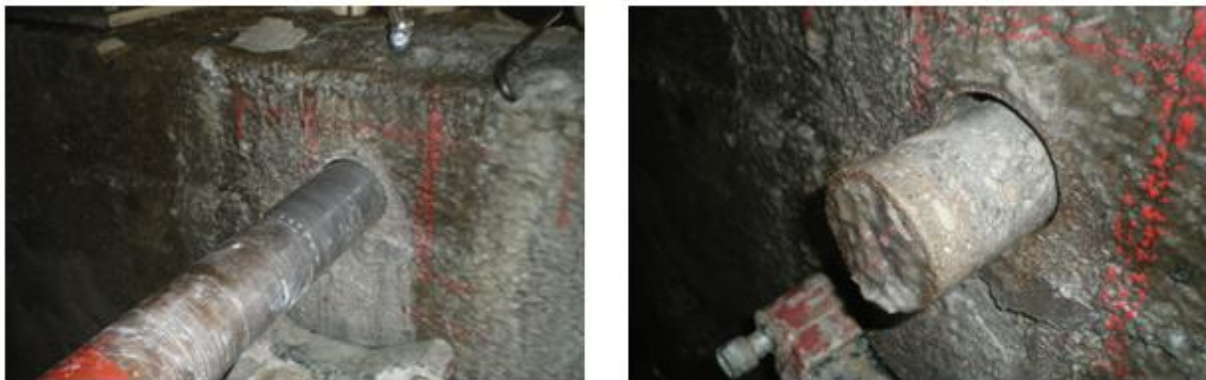


Figura 2: Proceso de extracción de una probeta testigo de hormigón, tras la realización del ensayo mediante ultrasonidos.

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 obtenidos y han sido cotejados con otros resultados de distintos procesos de ensayos en estructuras existentes.

3. Resultados

En la siguiente tabla se muestran de manera resumida, los resultados obtenidos del proceso de investigación, para los valores de Resistencia a Compresión (R) y de Velocidad de Velocidad de Ultrasonidos (V).

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

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
Localización 1 (L1)	138	15,96	3.387	14,80	3.466	7,11	519
Localización 2 (L2)	42	20,10	3.619	22,20	3.747	9,57	603

Estos valores analizados para los 180 elementos estudiados - seleccionados, 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 (MURPHY, 2008).

De los resultados obtenidos se interpreta que:

- Los valores medios de resistencia para los subgrupos de edad 1 ($R = 20,58 \text{ N/mm}^2$) y localización - situación 2 ($R = 20,10 \text{ N/mm}^2$), 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 ($R = 15,01 \text{ N/mm}^2$) y de Localización 1 ($R = 15,96 \text{ N/mm}^2$) 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 (INSTRUCCIÓN 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).

De esta exposición de resultados se pueden plantear algunas ideas para la discusión:

- La menor resistencia respecto a la normativa existente, en todos los casos estudiados se justifica porque los datos obtenidos corresponden a edificios “con problemas” de uno u otro tipo, que requieren el chequeo – auscultación estructural.
- Los valores de resistencia en edificios en la costa y con mayor edad se justifican porque están más afectados por la presencia medioambiental y por la propia fatiga del hormigón con el paso del tiempo, respectivamente.

Correlaciones (r)

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

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, mas resistencia) y significativa, por lo que no corresponde a fenómenos debidos al azar (CHAMBERS AND TUKEY, 1983).

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) y en los de localización 2 (L2), que corresponde a edificios de menor edad y a los más alejados de la costa (identificados con edificios del tipo “C”). Y es menor la confianza en edificios con estructura de hormigón de mayor edad (Edad 2) y los situados más cerca de la costa (Localización 1), por tanto más afectados por su situación medioambiental relacionada con la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. (Edificios tipo “B”).

Analizando los datos de que se dispone y aplicando la Técnica ANOVA (Analisis of Variance) a los valores de las variables Resistencia (R) y Velocidad (V), para los dos factores de localización (L1 y L2) y de edad (E1 y E2), de las estructuras de hormigón a analizar, tenemos que:

- Se confirma la diferencia significativa entre los valores medios de velocidades (V) y de resistencias (R), entre las estructuras a más y a menos de 500 metros de la playa (Con una significación o “p-valor” de 0,000).
- Se confirma la diferencia significativa entre los valores medios de resistencia y de velocidades, entre las estructuras de más y de menos de veinte años de edad (Con una significación o “p-valor” de 0,000).
- Se observa que el valor estimado para la velocidad media de los edificios más jóvenes es de 3.656 m/seg, y la resistencia de 20,58 N/mm², mientras que en los de mayor edad es de 3.329 m/seg y de 15,96 N/mm².
- El análisis del efecto interacción entre los factores de localización y de edad, permite afirmar que es significativo el efecto interacción (con un p-valor de 0,039), es decir, que cuando se dan estas dos circunstancias (estructura joven y lejos de la costa), el efecto que tienen aumenta y se potencia por tanto la diferencia. En esos casos, el nivel de confianza de los resultados es mucho mayor y por tanto, las conclusiones a las que se llegarían en un chequeo estructural, serían mucho más fiables. (Es el caso de L2 y E1, identificado como Edificio tipo “C”).

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” (R^2) es mayor en todos los casos, respecto a la regresión lineal, para cada una de las sub-poblaciones estudiadas. (BELSLEY, KUH AND WELSCH, 1980).

Se exponen algunas otras consideraciones y discusiones, respecto al análisis de los datos, emitiendo los siguientes comentarios:

- En caso de igualdad de R^2 (poder explicativo), se recomienda el uso del modelo más simple (principio de parsimonia), por tanto, se utilizará la regresión lineal. No es este el caso, por lo que utilizaríamos la regresión cuadrática.
- El modelo de población total se va a utilizar en pocas ocasiones, porque siempre se conocerá la localización y la edad aproximada de la estructura, en el momento de la realización del chequeo estructural, por lo que se analizarán entonces por subpoblaciones (L1, L2; E1, E2; Edificios A, B, C y D).
- El modelo que mejor funciona es el de los inmuebles “más jóvenes” (E1) con casi un 70% ($R^2 = 0,693$) de confianza del valor de la resistencia, en función de la velocidad. Sin embargo en los edificios más antiguos (E2) no se ajustan con esa precisión. ($R^2 = 0,370$).
- En cuanto a la situación – localización de la estructura, el modelo se ajusta mejor a los edificios situados más lejos de la costa ($R^2 = 0,630$), menos afectados por el ambiente (L2).
- Si se da el caso de un edificio joven (E1) y situado más lejos de la costa (L2), se aprecia una interacción muy significativa entre ellos. Los dos modelos son válidos, con un alto poder explicativo (casi de un 70% con un $R^2 = 0,693$ y $R^2 = 0,630$, respectivamente). Este es el caso de los ya referidos edificios tipo “C”.

Como discusión de resultados, 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 (COMISION PERMANENTE DEL HORMIGON) e internacional (GUIDE BOOK NON DESTRUCTIVE TESTING. ATOMIC ENERGY AGENCY VIENA), 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 (Tomada de la bibliografía referida)

VELOCIDAD PROPAGACIÓN (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

Como aportación de este trabajo de investigación, y de cara a una futura propuesta normativa, se complementa la citada tabla, con un mayor espectro de “niveles de calidad del hormigón” 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 Localización 1 y 2 (L1 y L2) y de edad 1 y 2 (E1 y E2) (Tabla 6).



Figura 3: Otros dos detalles del proceso de análisis de ultrasonidos (izquierda) y momento de extracción de una probeta testigo (derecha).

Tabla 6. Propuesta definitiva de clasificación del hormigón (Aportación de los autores)

PROPUESTA DE CLASIFICACION CALIDAD DEL HORMIGON					
TABLA DE CORRELACION DE RESULTADOS (Con Velocidad y Resistencia)					
VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/seg)	CALIDAD DEL HORMIGON (**)	RESISTENCIAS MEDIAS (N/mm2) (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).

Modelos de correlación

En este apartado se presentan los modelos de correlación obtenidos, para todas las estructuras en general y para los casos particulares: L1, L2, E1, E2.

Tabla 7. Propuesta inicial de modelo de correlación (Aportación de los autores)

Para todas las estructuras: Resistencia media estimada = $50,529 - 0,032 * \text{Velocidad} + 0,000006286 * (\text{Velocidad})^2$
Situación- Localización 1 (L1): Resistencia media estimada = $56,519 - 0,035 * \text{Velocidad} + 0,000006 * (\text{Velocidad})^2$
Situación- Localización 2 (L2): Resistencia media estimada = $21,207 - 0,015 * \text{Velocidad} + 0,000004076 * (\text{Velocidad})^2$
Edad 1 (E1): Resistencia media estimada = $7,350 - 0,008 * \text{Velocidad} + 0,000003172 * (\text{Velocidad})^2$
Edad 2 (E2): Resistencia media estimada = $48,138 - 0,029 * \text{Velocidad} + 0,000005595 * (\text{Velocidad})^2$

Estas expresiones han sido calculadas por los métodos estadísticos citados, aplicando el software referido y posteriormente verificadas o testadas, con un análisis matemático de los resultados.

Una vez confeccionadas las curvas y rectas de regresión y sus correspondientes expresiones matemáticas (Regresión cuadrática y regresión lineal, respectivamente), se han obtenido los modelos, uno para cada sub-población. Se exponen las gráficas de correlación – regresión cuadrática, para los distintos modelos de estructura analizados, donde de forma gráfica se pueden obtener valores de resistencia media (R) de un elemento de hormigón, en función de

la velocidad de ultrasonidos (V). De todas estas gráficas se confirma que las curvas - rectas de regresión, coinciden con las obtenidas y presentadas con anterioridad y responden a la expresión matemática del modelo propuesto, para cada una de las subpoblaciones estudiadas. (Edificios tipo A, B, C, y D), para facilitar su aplicación concreta en cualquier análisis – peritación, de cualquier elemento estructural, en cualquiera de las cuatro circunstancias analizadas, para cualquiera de las cuatros subpoblaciones investigadas.

Tabla 8. Propuesta final de modelos de correlación (Aportación de los autores)

Edificios "A": Resistencia = $26,622 - 0,022 * \text{Velocidad} + 0,000005557 * \text{Velocidad}^2$
Edificios "B": Resistencia = $47,568 - 0,027 * \text{Velocidad} + 0,00000516 * \text{Velocidad}^2$
Edificios "C": Resistencia = $-34,709 + 0,023 * \text{Velocidad} - 0,00000175 * \text{Velocidad}^2$
Edificios "D": Resistencia = $100,787 - 0,071 * \text{Velocidad} + 0,0000131 * \text{Velocidad}^2$

Además se aprecian las curvas con las que se han generado las franjas de mayor fiabilidad, denominadas "bandas de confianza", donde en todos los casos, se encuentran los valores más probables de resistencia, de las piezas de hormigón armado objeto de chequeo, con un 95% de confianza.

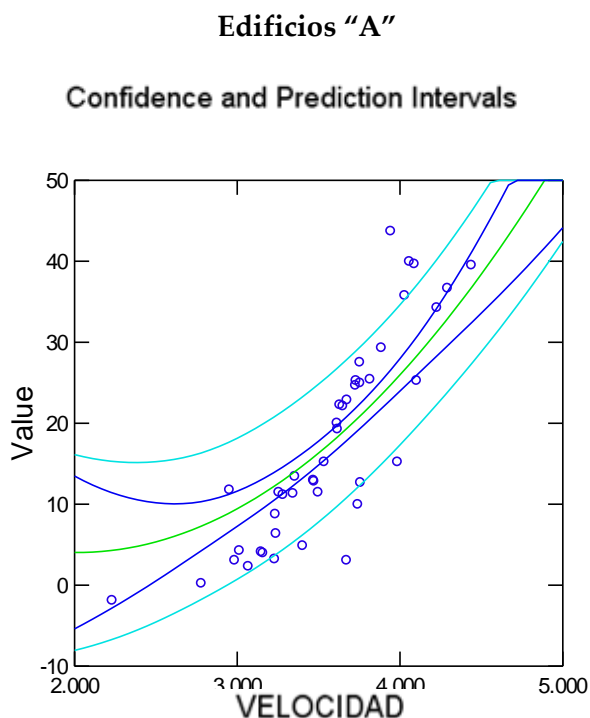


Figura 4: Curva de regresión cuadrática para estructuras en edificios Tipo "A".

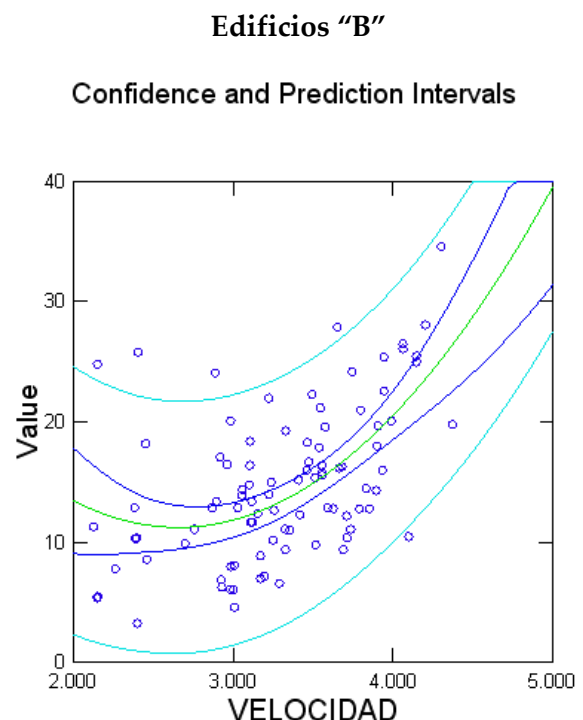


Figura 5: Curva de regresión cuadrática para estructuras en edificios Tipo "B".

Edificios "C"

Confidence and Prediction Intervals

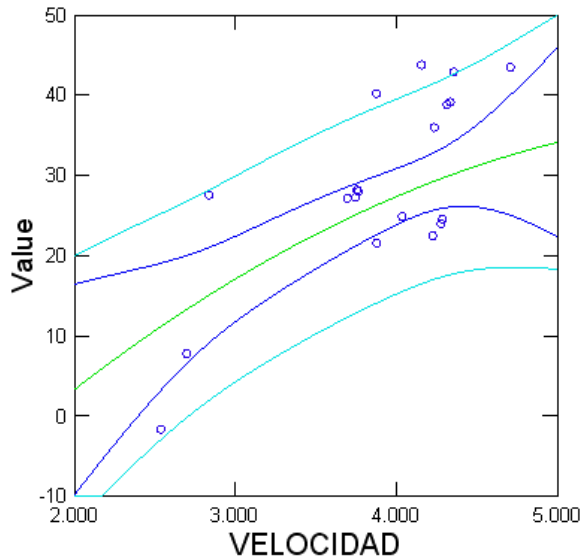


Figura 6: Curva de regresión cuadrática para estructuras en edificios Tipo "C".

Edificios "D"

Confidence and Prediction Intervals

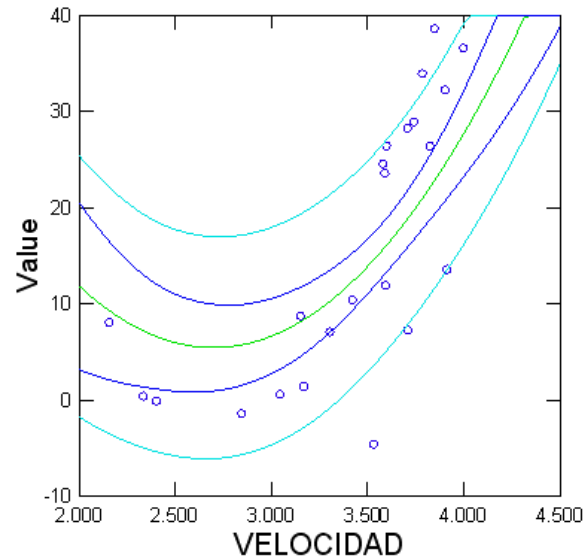


Figura 7: Curva de regresión cuadrática para estructuras en edificios Tipo "D".

VELOCIDAD: velocidad de ultrasonidos (m/seg)
 VALUE: valor de resistencia a compresión del hormigón (N/mm²)

4. 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.

- 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, etc.), con la responsabilidad que ello conlleva.
- Los resultados obtenidos en la investigación facilitan la toma de decisiones en la evaluación de la seguridad estructural del elemento de hormigón armado. Pues estos resultados 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, ya que los resultados de las

correlaciones nos confirman su aptitud para el uso a que se destinan, pudiendo proporcionar excelentes resultados en una evaluación – peritación estructural, para cualquier estructura de hormigón armado.

En cuanto a los valores de (R) y (V) obtenidos:

Tabla 9. Propuesta definitiva de clasificación del hormigón (Aportación de los autores)

PROPUESTA DE CORRELACION DE RESULTADOS (Con Velocidad y Resistencia)					
VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/seg)	RESISTENCIAS MEDIAS (N/mm ²) (Valor esperado)				
	TODAS LAS ESTRUTURAS	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.

- 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.

En cuanto al 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.
- 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 variables de localización L1 y L2 y con edad E1 y E2.

Con este análisis estadístico, posterior interpretación de datos, su aplicación práctica, aplicación de las expresiones matemáticas y la representación gráfica, para cada uno de los modelos propuestos, para las distintas subpoblaciones que han sido objeto de estudio, se

dispone de una eficaz herramienta para su uso en trabajos de peritación – evaluación estructural.

Se proponen así, para finalizar y como aportación de esta investigación, las fórmulas matemáticas para los modelos de correlación propuestos entre las dos variables, Resistencia (R) y Velocidad (V), para todas las estructuras analizadas, para los dos subgrupos de situación – localización. (A más o menos de 500 m de la costa) y para los dos subgrupos de edad (más o menos de veinte años), la anterior tabla resumen (Tabla 9) y los gráficos de correlación expuestos, como novedad para una propuesta de normativa.

Bibliografía

BELSLEY, D.A. E. KUH, and R.E. WELSCH. (1980). *Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity*. New York, NY.

CHAMBERS, J.M., CLEVELAND W.S., KLEINER B., and TUKEY, P.A. (1983). *Graphical methods for data analysis*. Duxbury Press, Boston, MA.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN (CPH).

FACAOARU I. and LUGNANI C. E & FN Spon. (1993). *Contributions to the diagnosis of stone and concrete historical structures using non-destructive techniques*.

GUIDE BOOK NON DESTRUCTIVE TESTING. ATOMIC ENERGY AGENCY VIENA. (2002).

HENRY J.L. (2009). *Optimización del control de la resistencia de hormigones endurecidos mediante ultrasonidos*. UPB.

MURPHY THOMAS AND LAU.ALEX. (2008). *Manejo de valores atípicos*. ASQS Quality Press.