



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Chequeo de estructuras de hormigón armado: análisis de la relación de resultados de probetas testigo y ultrasonidos

Jesús Herminio Alcañiz Martínez



Tesis

**Doctorales**

[www.eltallerdigital.com](http://www.eltallerdigital.com)

UNIVERSIDAD de ALICANTE

chequeo de  
estructuras de  
hormigón armado:  
análisis de la relación  
de resultados de  
probetas testigo y ultrasonidos.

**Doctorando:**

Jesús H. Alcañiz Martínez

Arquitecto Técnico.

Ingeniero de Edificación.

Máster en Gestión de la Edificación.

**Director:**

Don Miguel Louis Cereceda.

Doctor Arquitecto.

Miembro Unidad Asociada CSIC

Director Sede SICOP - Alicante

Departamento de Construcciones Arquitectónicas

Escuela Politécnica Superior

Universidad de Alicante

**ALICANTE, Junio de 2011.**



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

“Life is what happens to you while you are busy making other plans”. (“Double Fantasy” - 1980).

“La vida es eso que ocurre mientras estás ocupado haciendo otras cosas”. (“Double Fantasy” - 1980).

Jonh Lennon



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

“Material test results should not be used directly in the resistance equations, however, testing may be used to establish a strength equivalent to the specified strength upon which resistance equations are based”

“More often than not, the drilling and testing of cores can create more problems than they solve if an attempt is made to relate the strength of cores to the strength of controls cylinders”

“A large number of factors which can affect the compressive strength of cores and unless allowance is made for the effect of these factors, which provide contradictory evidence about the effects of this factors on the core test results”

Michael Bartlett and James Mac Gregor.  
Department of Civil Engineering  
University of Alberta.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

No se debe olvidar que el Método Científico, sigue un claro proceso en su desarrollo:

- Observación, descripción y reflexión.
- Hipótesis, experimentación e interpretación.
- Discusión, conclusión y comunicación.

Que este trabajo sirva de aportación a las técnicas de interpretación de resultados en chequeos estructurales y suponga también, un reconocimiento a las normas AMERICAN CONCRETE INSTITUT (ACI), a las Normas Europeas (NEW EUROPEAN STANDARDS FOR CONCRETE); a las BRITISH ESTANDARD – BS, a las DEUTSCHEN BETON NORMEN – DIN/EN, a las REGLES BAEL 99: TECHNIQUES ET CONSTRUCTIONS EN BETON ARMÉ y especialmente a la INSTRUCCIÓN EHE – 08. Que nos guíe su Artículo 86.8: Ensayos de Información Complementaria, base de inicio de esta Tesis Doctoral.

El Autor





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

A mi Universidad, la UNIVERSIDAD CATOLICA “SAN ANTONIO” DE MURCIA (UCAM), por la que me embarqué en este ambicioso, apasionado y arriesgado proyecto.

A los distintos Laboratorios Acreditados, que han puesto todos sus medios a disposición de esta investigación y especialmente a aquellos que han facilitado toda la información de resultados de ensayos, por su inestimable colaboración y apoyo.

A mis amigos y compañeros ya doctores, porque con sus consejos me han ayudado y me he sentido animado y apoyado. A todos los que de una u otra forma, me habéis ayudado.

A mi Director de la Tesis Doctoral, por su dedicación y esfuerzo para orientarme.

A mi familia, por el tiempo que durante todo este periodo, le he robado. A Josefina, mi mujer.

Para vosotros, María y Jesús.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## CONTENIDO

	P á g i n a
PREAMBULO .....	13
RESUMEN: Palabras clave.....	15
ABSTRACT: Keywords. ....	19
1.- ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN .....	23
1.1.- Origen de la investigación: Justificación del trabajo.....	25
1.2.- Primeros trabajos.....	26
1.3.- Objetivos de la investigación.....	28
1.4.- Hipótesis de partida.....	30
2.- EL ESTADO DEL ARTE.....	35
2.1.- La técnica, su uso y los Laboratorios de Ensayo .....	38
2.2.- Otras Investigaciones: Disponibilidad bibliográfica .....	39
2.3.- Factores que influyen .....	44
3.- METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA .....	47
3.1.- Planificación de los trabajos .....	50
3.2.- Las técnicas: Herramientas .....	53
(Ultrasonidos, Profómetro, Probetas Testigo, etc.)	
3.3.- Los casos más frecuentes.....	82
3.4.- Metodología estadística .....	86
4.- PROCESO DE INVESTIGACIÓN.....	105
4.1.- Toma de datos y ensayos realizados.....	107
4.2.- Determinación del tamaño muestral .....	108
4.3.- Recopilación de datos.....	112

---

5.- ANALISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	119
5.1.- Análisis global de los datos.....	122
(Exploratorios, depuración de datos, estadísticos descriptivos, ajustes y correlaciones)	
5.2.- Comparación de subpoblaciones.....	138
(Edad, localización, efecto interacción)	
5.3.- Análisis estadístico de subpoblaciones.....	147
(Exploratorio, descriptivo y regresión)	
5.4.- Análisis estadístico según tipología de edificios.....	163
(Estructuras tipo: A, B, C y D)	
5.5.- Análisis de las bandas de confianza .....	170
5.6.- Discusión de los resultados.....	179
6.- CONCLUSIONES.....	191
Nuevas líneas de investigación.	
RESEÑA BIBLIOGRAFICA.....	203
RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS, TABLAS Y GRÁFICOS .....	211
A N E J O S.	
Gráficos de Correlación de Resultados V y R	

---

ALICANTE, Junio de 2011

## PREÁMBULO

Esta Tesis Doctoral, fruto de la actividad profesional del doctorando, dedicado al mundo del Laboratorio de Ensayos y del Control de Calidad en Construcción durante más de treinta años y paralelamente a la docencia universitaria en los últimos quince.

Para el planteamiento del tema se han conjugado ambas circunstancias, que dieron paso al inicio de este gran proyecto personal – profesional – docente – universitario y de investigación.

En ese sentido, se puede afirmar que durante la vida profesional en el Laboratorio de Ensayos, la dedicación del doctorando que suscribe, se centró en las actividades propias de control de calidad de obras, chequeos de estructuras, ensayos “in situ”, inspección, evaluación estructural – peritación de seguridad y en la realización de los trabajos propios de patología en construcción.

Paralelamente a este periodo de laboratorio en la empresa privada, es de destacar la participación en actividades de investigación, en actividades formativas, asistencia a congresos especializados, presentación y exposición de ponencias relacionadas con el Control de Calidad, Chequeos Estructurales, Patología de Obras y otras actuaciones colaterales.

Más tarde, durante el periodo de dedicación conjunta y simultánea con la docencia universitaria, fue clave el contacto con los alumnos, su necesidad de formación e información y la falta de “espacios” en nuestros planes docentes, para la integración de este “campo del conocimiento”, que ha sido otro de los factores que han impulsado la necesidad de realizar esta tesis.

Y para finalizar, afirmar que con los resultados alcanzados en esta Tesis Doctoral no se pretende dar una solución única y universal para los Chequeos de Estructuras de Hormigón Armado, sino que se ha tratado de establecer un mecanismo y definir unos métodos de análisis y de interpretación de resultados, científicamente probados, que resulten válidos para su uso posterior en evaluaciones estructurales – peritación de seguridad estructural, con las consecuencias que ello conlleva, para la toma de decisiones finales, en cuanto a la posibilidad de refuerzo, reparación o incluso demolición de una estructura de hormigón armado en servicio.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**RESUMEN. Palabras clave.**

Se debe empezar confirmando la importancia de la “resistencia estructural” en la edificación, frente a las distintas sollicitaciones, cargas, momentos, viento, sismo, etc.

Hasta ahora, para la estimación de las resistencias a compresión del hormigón, se había investigado sobre distintas técnicas y se habían planteado numerosas correlaciones entre sus resultados. La mayor parte de estas investigaciones, se habían llevado a cabo en un entorno de laboratorio y especialmente, con la extracción de probetas testigo, comparando los resultados, con valores de ensayos realizados como resultado de la toma de muestras de hormigón fresco. Otros, teniendo en cuenta el tipo de árido, con distintas dosificaciones, con variación de temperaturas, etc.

El presente trabajo, sin embargo, analiza los distintos resultados de ensayos y la relación existente entre la resistencia de las probetas testigo de hormigón curadas en laboratorio ( $R$ ) y las velocidades de ultrasonidos ( $V$ ), en elementos estructurales de hormigón armado, en casos de



---

estructuras reales de edificación. No se trata por tanto de probetas realizadas en laboratorio, sino extraídas de elementos de hormigón armado en estructuras ya ejecutadas y se ha procedido posteriormente, a su ensayo a compresión simple, para obtener la resistencia real del hormigón en la pieza ensayada. La aplicación del método de ultrasonido está basada en la correlación entre las propiedades del hormigón y la velocidad de propagación de las ondas longitudinales. Se ha estudiado la relación entre la velocidad de propagación y la resistencia del hormigón en probetas testigo y poder así obtener la mejor correlación entre ambas medidas.

Sus resultados a veces no presentan la uniformidad deseada, dada la influencia de factores varios, como diámetro de la probeta, altura y dirección de la extracción, condiciones de curado del hormigón, tipología de los áridos, presencia de armaduras – barras de armar, condiciones superficiales, temperatura ambiente, etc. Para reducir esta falta de uniformidad y conseguir una mayor fiabilidad en los resultados, se han conseguido unas fórmulas - expresiones matemáticas y unas rectas - curvas de regresión, que facilitan la toma de decisiones de los técnicos, usuarios de estos sistemas/herramientas de chequeo estructural, para su uso en la evaluación de la seguridad estructural - peritaciones.

Las variables fijadas han sido la distancia del edificio a la costa (según indicaciones de la INSTRUCCIÓN EHE-08, localizadas a más o menos de 500 metros) y la edad de la estructura (más o menos de 20 años), al tratarse de dos aspectos de gran interés, el primero por sus limitaciones normativas y el segundo porque es una edad crítica en un edificio, de cara a posibles actuaciones concretas de conservación, reparación, etc.

La tesis se divide en tres partes, la primera dedicada a la exposición del estado del arte, indicando las técnicas de ensayo (análisis mediante ultrasonidos y probetas testigo-resistencia a la compresión simple), como técnica de investigación del estado que presentan las estructuras de hormigón. Una segunda parte dedicada a la exposición de los resultados e interpretación de los mismos y una tercera y última parte dedicada al análisis matemático y estudios estadísticos, para las cuatro poblaciones estudiadas, según situación – localización y edad de la estructura, que conducen a la exposición de las conclusiones finales.

Con todo ello se puede concluir que:

1.- En las estructuras cercanas a la costa, nos encontramos con menores resistencias de hormigón, con valores medios de  $15,98 \text{ N/mm}^2$ , por debajo del valor medio obtenido en las más alejadas, de  $20,10 \text{ N/mm}^2$ . Esta situación avala la condición de mejora de durabilidad referida en la actual INTRUCCION EHE-08, donde las especificaciones son más restrictivas por su condición de agresividad ambiental.

2.- Los hormigones de las estructuras de menor edad, presentan valores medios de  $20,58 \text{ N/mm}^2$ , por encima de la media obtenida para los de mayor edad, de  $15,01 \text{ N/mm}^2$ .

3.- Para concretar estas situaciones, se han planteado cuatro modelos de rectas – curvas de regresión, para distintas alternativas o subpoblaciones (de edad y localización de la estructura), que facilitará la obtención del valor de resistencia más cercana al valor verdadero (que nunca se conocerá), de la resistencia del hormigón de cada una de las piezas analizadas, en el proceso de peritación y/o evaluación de la seguridad estructural de un inmueble.

4.- Para finalizar, se puede afirmar la gran equivalencia de los resultados obtenidos de las probetas testigo de hormigón (ensayos destructivos) y los obtenidos del análisis mediante ultrasonidos (ensayos no destructivos). En este sentido ha quedado demostrada la escasa desviación de los resultados obtenidos y por tanto se confirma que se trata de un método muy eficaz para la realización de chequeos estructurales, lo que proporciona, entre otras, las siguientes ventajas:

- Mayor agilidad y rapidez en la toma de datos.
- Menor necesidad de extracción de probetas testigo (se podría reducir el número de extracciones, y por tanto, se conseguiría una menor afección estructural, de los elementos analizados).
- Realización de un diagnóstico rápido y sencillo.

Todas estas ventajas y algunas más, supondrían una mayor facilidad y operatividad, de los procesos de toma de datos en los chequeos estructurales.

**Palabras clave:** Estructura. Vida útil. Chequeo. Seguridad Estructural. Ensayo. Prueba. Velocidad de Ultrasonidos. Resistencia a Compresión Simple.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**ABSTRACT. Keywords.**

It must be started confirming the importance of the “resistances of structures” in building, faced to different loads, structural moments, wind, earthquake, etc.

Until the present, for the estimation of the resistances in compression of concrete, it has been investigated about different techniques and planned several correlations between their results.

The major part of this investigation has been taken in a laboratory environment and specially, with the extraction of testing – cores, comparing the results with the values of the tests done, as a result of the tests done, as a result of the samples taken of fresh concrete. Other taking in count the type of aggregate, with different dosification, with a variation in temperature, etc.

The present work, however, analyse the different test result found on the relationship among the resistance of concrete cylinders (testing cores) cured in laboratory (R) and the ultrasonic pulse (V) on structural elements of reinforced concrete, in cases of real building structures. It does not

---

deal with cores made at the laboratory, but taken from real element made of the stressed concrete.

The extraction of the testing cores has been taken in the real structures elements and we have proceeded to the test them simple compression to obtain the real resistance of the concrete in the tested piece. The application of the ultrasonic pulse method is based on the correlation between the elastic properties (concrete strength) and the propagation velocity of a pulse of ultrasonic longitudinal waves. We have studied the correlation between pulse velocity and compressive strength from cores test to then obtain the graphical correlation between both results.

Their results, in some cases, present the uniformity that we look – for, because of various factors like core diameter, relation length – diameter, height and direction of extraction, curing condition, aggregates qualities, armed localisation – reinforcing bars, surface condition, ambient temperature, etc. To reduce this not uniformity and to obtain a more reliable in the results, we found several **mathematics expressions law** and **correlation - rectes curves**, to help the technician make the best decision, users of these system/tools for the structural checking, for the structural security evaluation – expertise.

The studied variables, has been the distance from the building to the sea (According to the indications of the INSTRUCCION EHE - 08, more or less than 500 meters) and the structure age (more or less of 20 years), as they are two very interesting aspects, the former due to legislative limits and the latter, because it is a critical age for a building, in order to possible specific conservation, and repairmen performances.

As you can see, the thesis is divided in three clear parts, the first one dedicated to the exposition of the test techniques (ultrasound - testing cores), as an investigation technique of the state that the concrete structures presents, a second part, dedicated to the exposition of the results and the interpretation of this one and a third and a last part, dedicated to the mathematical analysis and statistics studies for the four variables – possible locations and structures age, that will take to the exposition of the final conclusions.

With all of this we can concluded that:

1.- In other structures near the coast we find minor resistances of concrete, with average values of  $15,98 \text{ N/mm}^2$ , under the average value obtain of the more distance, of  $20,10 \text{ N/mm}^2$ . This situation confirm the condition of increased the durability of actual INSTRUCCION EHE-08, where the specification are more restrictive because of the condition of the environment aggressively.

2.- The concrete of structures of less age present averages values of  $20,58 \text{ N/mm}^2$ , over the average obtain. To the more age, on  $15,01 \text{ N/mm}^2$ .

3.- To specificity this situation it has been planed four regression models to distinguish different alternatives (the age and location of structures) which will facility the obtain resistance values nearer of the true value (which we don't know), of the resistance of concrete of each analysed element, in the peritacion – expertise process and/or the evaluation of the structures security of building.

4.- As a conclusion, it can be stated the great similarity of the results achieved of the concrete test core (destructive tests) and the achieved through ultrasonic pulse (non destructive tests). In this sense, it has been proved the scarce deviation of achieved results and therefore it is confirmed that it is a very useful for the completion of structural checks, which provides, with, among others, the following advantages:

- Higher capability and speed in taking information.
- Lower necessity of taking test cores (the amount of taking could be reduced and therefore a lower structural affection of analyzed elements would be achieved).
- Making of a quicker and simpler diagnosis.

All of these advantages and some else, would mean higher facility and operation, of processes of taken information in the structural checks.

**Keywords:** Structure. Useful Life. Check. Security of structures. Test. Sample.Ultrasound speed. Simple Compressive Strength.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# 1



## **1.- ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN**

- 1.1.- Origen de la investigación:  
Justificación del trabajo**
- 1.2.- Primeros trabajos**
- 1.3.- Objetivos de la investigación**
- 1.4.- Hipótesis de partida**

“La investigación es el proceso de búsqueda de nueva información, con una adecuada metodología, análisis de datos, discusión de resultados y emisión de las conclusiones a que todo ello nos conduce.”

El Autor



**1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN**

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN**

---

**1.- ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN.**

Para el proceso de desarrollo de la investigación de esta Tesis Doctoral, se procede a la recopilación de datos, su minucioso análisis, interpretación de resultados, conclusión y la necesaria exposición documental final, a través de este trabajo.

**1.1.- Origen de la investigación: Justificación del trabajo.**

Se desarrolla esta Tesis Doctoral como trabajo de investigación, continuación de una primera actuación en el Proyecto Final de Máster (P.F.M), al que su autor denominó como “CHEQUEO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO: ANÁLISIS DE MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN”, en el que ya se investigó sobre las distintas técnicas de ensayo de chequeo de estructuras de hormigón armado, así como su metodología de análisis, que facilitaba una importante herramienta al técnico - profesional del sector de la construcción, que lo necesite en el desarrollo de su actividad habitual, especialmente para su uso en evaluaciones estructurales – estudios de seguridad – peritación de estructuras de hormigón armado.

## 1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN

Se pretendía en aquel momento con ese proyecto, enmarcado dentro del programa de Postgrado del MASTER DE GESTION DE LA EDIFICACION, impartido en la UNIVERSIDAD DE ALICANTE (UA), realizar una preparación e inicio de los planteamientos de estudio e investigación para esta Tesis Doctoral de quien suscribe, centrándonos ya en el uso exclusivo de los valores de Velocidad de Ultrasonidos (V) y de la Resistencia a Compresión (R), obtenidos tras la extracción de las correspondientes Probetas Testigo de Hormigón. (Ver Fotografías nº 1 y 2). Los valores de resistencia a compresión simple, obtenidas mediante ensayo de laboratorio, según la Norma UNE –EN: 12390-3: Ensayo a compresión simple de Probetas Testigo y los Valores del Ensayo de Ultrasonidos, con medición de la velocidad ultrasónica de propagación de ondas, realizado “in situ”, en la propia obra, según la norma UNE – EN – 12504-4.



**Fotografía nº 1**  
**Inspección proceso de extracción.**

Aspecto general del proceso de extracción de una probeta testigo de hormigón de un pilar, tras la realización del correspondiente Análisis por Ultrasonidos, en presencia del doctorando.

Tiene este trabajo un doble carácter de tesis de “compilación” y tesis de “investigación”, con un claro perfil de tesis de “investigación descriptiva”, con un amplio componente de divulgación, para futuras actuaciones e iniciativas de formación en las aulas universitarias.

### 1.2.- Primeros trabajos.

Para centrar más este trabajo se ha considerado un factor muy importante: “La dimensión”. En primer lugar para acotar el campo de actuación, centrándonos exclusivamente en estructuras de hormigón armado en edificación. . (Ver fotografías nº 1 y 2). En segundo lugar, es muy importante considerar el “tamaño del elemento”, habiéndonos centrado en pilares en estructuras de edificación, como elementos estructurales accesibles a los procedimientos de ensayo y más significativos de las estructuras.

## 1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de este trabajo, se entiende necesaria una labor de compilación, con anteriores experiencias del doctorando, dándole un valor muy relevante a la labor de investigación científica, desarrollada con un sencillo procedimiento científico, con los siguientes objetivos:

- Que su estudio, métodos, procedimientos etc., sean reconocibles por terceros.
- Que recoja el análisis crítico, refutaciones y otras objeciones a lo ya publicado con anterioridad, sobre los temas tratados en esta Tesis.
- Que sea útil para los técnicos de edificación, en el desarrollo de su actividad profesional, como contribución al propio desarrollo de sus conocimientos, en labores de evaluación - peritación estructural.
- Que de pie al inicio de futuras investigaciones, utilizando las mismas u otras variables alternativas, que amplíen y si cabe, mejoren las conclusiones a las que se ha llegado.

Se quiere establecer desde el inicio del desarrollo de esta Tesis, cual es el centro principal y el objetivo del trabajo (dado el general desconocimiento y escaso uso de las herramientas disponibles), estudio de sus aspectos periféricos (la descripción, para algunos técnicos - profesionales ya conocida, de cada uno de ellos) y finalmente y más importante, su análisis – interpretación de resultados, que sin duda serán suficientemente fiables, con la obtención de las fórmulas matemáticas y curvas de correlación para cada tipo de estructura.

Se ha utilizado la información bibliográfica existente a la que se ha tenido acceso, analizando anteriores exposiciones de autores precedentes, detectando posibles errores, incorrecciones y/o posibles limitaciones en la investigación, acotando claramente el objetivo final propuesto, que se expone y analiza más adelante.

Con este trabajo se quiere también llegar a la conclusión de demostrar que:

- Que no todas las herramientas disponibles son adecuadas, para un correcto diagnóstico estructural: Se hace necesaria su discriminación.
- Que su adecuado uso y posterior interpretación de resultados, supondrá una herramienta básica para la posterior toma de decisiones, tras los pertinentes

## 1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN

estudios de evaluación estructural o peritación de la estructura.

- Que los resultados de correlaciones entre probetas testigos y ultrasonidos, varían en función de la localización (posición geográfica) del edificio (costa o interior) y de la edad de la estructura (mayor o menor de 20 años).
- Que existe una clara correlación de los valores de resistencia (R) y de velocidad (V), lo que permite obtener estimaciones de resistencia reales, en función de lecturas de ultrasonidos (Como ensayo no destructivo).

Y sobre todo, se habrá desarrollado un claro método de trabajo, llegando así a unas conclusiones muy claras de cómo interpretar los resultados obtenidos mediante las técnicas de correlación, para conseguir una mayor fiabilidad de la evaluación de la estructura de hormigón armado.

### 1.3.- Objetivos de la investigación.

Cuando se planteaban los objetivos de esta investigación, desde el punto de vista científico, de cara a demostrar las hipótesis de partida, se organizaron con un objetivo general y un objetivo específico.

Como **objetivo general**, se trata de estudiar los métodos para el chequeo de estructuras de hormigón armado y sus técnicas de investigación, para posteriores evaluaciones estructurales.

El **objetivo específico**, es estimar la relación existente entre ultrasonidos (Velocidad, en m/seg.) y la Resistencia, obtenida de las probetas testigo de hormigón - Resistencia a Compresión Simple en Mpa (Véase fotografía nº 2: Probeta testigo previamente al ensayo en laboratorio). Se pretende con ello profundizar en el conocimiento científico – técnico, sobre las herramientas para una adecuada evaluación estructural, destacando la fiabilidad del ensayo mediante ultrasonidos, como método no destructivo (END).

**1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN****Fotografía nº 2****Inspección Probeta Testigo.**

Primera inspección visual de la probeta testigo extraída, previamente a la realización de la comprobación de carbonatación del hormigón, previamente a su traslado al Laboratorio Acreditado, para su posterior ensayo a compresión simple.

Se puede confirmar que el objeto específico de esta Tesis Doctoral, se plantea con unas claras ideas – aspectos y a conseguir:

- Obtener unas fórmulas – expresiones matemáticas, que relacionen los datos de ambos ensayos y la correlación entre ellos.
- Definir el “intervalo, banda o región de confianza” para estimar el valor verdadero del resultado que se busca en cada proceso de chequeo, para cada estructura.
- Obtener unos diagramas – rectas – curvas de regresión, que permitan acercarse con la máxima confianza a los valores verdaderos de resistencia de hormigón, (R) según las lecturas del análisis ultrasónico – velocidad (V).
- Disponer de una herramienta básica de correlación de estos datos, en función de la posición – localización del edificio, a más o menos de 500 metros de la costa (Referidos en la INSTRUCCIÓN EHE-08) y de más o menos de 20 años de edad, con expresiones matemáticas de correlación, suficientemente fiables.
- Disponer de una documentación clara y accesible al técnico usuario y como base de futuras actuaciones de divulgación y de formación en el ámbito profesional y en el entorno universitario.

Todo ello con un importante apoyo de las necesarias expresiones matemáticas y utilizando las actuales técnicas de análisis estadístico, para conseguir la mayor fiabilidad en la conclusión final (ASTM – E – STATISTIC, 2008).

## **1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN**

Llegados a este punto, el doctorando que suscribe puede afirmar que se han obtenido unas fórmulas con un alto valor explicativo (confianza), para estimar resistencias asociadas al hormigón, en función de algunas resistencias reales, relacionadas con los valores de velocidades ultrasónicas, como se verá más adelante y como se expone finalmente en las conclusiones. La herramienta referida es una fiable gráfica – recta – curva de regresión y una fórmula – expresión matemática asociada, para cada tipología de estructura de hormigón armado en edificación, con las variables que manejamos, de localización geográfica del edificio (más o menos de 500 metros de la costa marina) y de edad (mayor o menor de 20 años), que se han identificado como L1 y L2 (localización) y como E1 y E2 (Edad), respectivamente.

### **1.4.- Hipótesis de partida.**

La hipótesis de la que se parte desde el inicio del trabajo, para el desarrollo de esta investigación, se basa en el conocimiento de la existencia de grandes dispersiones que aparecen en los datos de los chequeos estructurales convencionales que realizamos en las obras objeto de evaluación – peritación, debido a la existencia de gran cantidad de variables totalmente incontroladas, entre las que destacan la influencia de la carbonatación superficial, porosidad, compacidad del hormigón, presencia de mayor o menor cuantía de acero de armar, características – tipología de los áridos y otros que se comentan más adelante (ACHE, 2003). También generan problemas de interpretación de resultados, los valores extremos, por arriba o por abajo, con lo cual se hace necesario encontrar una franja – banda – región - intervalo de confianza, donde se encontraría sin duda, el valor real que se está buscando (MURPHI THOMAS AND LAU ALEX. ASQC, 2008).

Por ello se mantiene la hipótesis basada en la correlación entre los valores - datos obtenidos del análisis mediante ultrasonidos y las resistencias a compresión de las probetas testigo de hormigón, que en función de su localización geográfica y de su edad, podría generar una correlación lineal o potencial, con la obtención de una fórmula – expresión matemática, mediante la cual, en función de los valores de ultrasonidos (Ensayo No Destructivo - END) se obtuvieran unos valores ciertos de la resistencia a compresión, asignada al elemento de hormigón armado estudiado.

Para ello, se ha trabajado con dos variables medibles y con una clara trazabilidad en su

## 1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN

obtención y en su análisis y tratamiento posterior:

- Localización del Edificio: A más o menos de 500 metros de la línea marina (Ver referencias en Artículo 8.2.1 y 2, de la INSTRUCCIÓN EHE – 08, en relación con el “ambiente”). L1, menos de 500 m y L2, más de 500 m.
- Edad de la estructura del inmueble (Más o menos de 20 años desde la ejecución de la estructura de hormigón armado). E1, menos de 20 años y E2, más de 20 años.

Con este planteamiento se está en disposición de contrastar sobre el distinto comportamiento estructural en uno u otro caso, según el estado de la estructura analizada, con los cuatro tipos de edificios siguientes:

**Edificio tipo “A”:**L1: Localización 1 (menos de 500 metros de la costa).

E1: Edad 1 (menos de 20 años de antigüedad).

**Edificio tipo “B”:**L1: Localización 1 (menos de 500 metros de la costa).

E2: Edad 2(más de 20 años de antigüedad).

**Edificio tipo “C”:**L2: Localización 2 (más de 500 metros de la costa).

E1: Edad 1 (menos de 20 años de antigüedad).

**Edificio tipo “D”:**L2: Localización 2 (más de 500 metros de la costa).

E2: Edad 2 (más de 20 años de antigüedad).

Se tiene en cuenta en todo momento la normativa origen de la aplicación de estas técnicas de chequeo y de evaluación de elementos de hormigón armado, tanto internacionales (AMERICAN CONCRETE INSTITUT - ACI, NEW EUROPEAN STANDARDS FOR CONCRETE; BRITISH ESTANDARD – BS, DEUTSCHEN BETON NORMEN – DIN/EN, REGLES BAEI 99: TECHNIQUES ET CONSTRUCTIONS EN BETON ARMÉ), como nacional: La Instrucción de Hormigón INSTRUCCIÓN EH – 68 (R. D. 2987/1968), la INSTRUCCIÓN EH – 73 (R. D. 3062/1973) que ya en su Artículo 65 avanzaba aspectos relacionados con los “ensayos de



## 1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN

información del hormigón”. La INSTRUCCIÓN EH - 80 (R. D. 2868/1980) en su artículo 70 y la EH-88 (R. D. 824/1988). Estas Instrucciones de Hormigón más antiguas dieron paso a la INSTRUCCIÓN EH – 91 (R. D. 1039/1991), que hace referencia a estos ensayos en su artículo 73. Posteriormente se dio un gran paso en cuanto a la durabilidad de los hormigones, con la publicación de la INSTRUCCIÓN EHE en su edición de 1998, en su artículo 89: Ensayos de Información. (Real Decreto RD. 2661/1998), norma de hormigón, de obligado cumplimiento a finales de los años noventa en nuestro país y que ya anticipaba lo siguiente:

*Artículo 89º. Ensayos de información complementaria del hormigón (EHE – 98):*

*Los ensayos de información del hormigón pueden consistir en:*

- a) La fabricación y rotura de probetas, en forma análoga.*
- b) La rotura de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido (método de ensayo según UNE 83302:84, 83303:84 y 83304:84). Esta forma de ensayo no deberá realizarse cuando dicha extracción afecte 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.*
- c) El empleo de métodos no destructivos fiables, como complemento de los anteriormente descritos y debidamente correlacionados con los mismos.*

Y en la actualidad, la INSTRUCCIÓN EHE – 08, de la que se destacan dos importantes aspectos: Lo relacionado en el Artículo 86.8, como base del conocimiento de los “Ensayos de Información” (continuación y avance de los aspectos normativos anteriormente expuestos) y del Artículo 8.2.1 y 2, donde se plantean los aspectos relacionados con la influencia de los “ambientes”, según la situación de la obra, en el comportamiento de las estructuras de hormigón armado.

Respecto al Artículo 86.8 (Ensayos de Información), se confirma que los métodos de ensayo utilizados en esta Tesis Doctoral, se encuadran en este tipo: Ensayos de Información de Estructuras ya acabadas. Se recuerdan a continuación, alguno de los párrafos relacionados con este trabajo y que transcribimos en *letra cursiva*:

**1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN***INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (EHE-08)**Artículo 86.8. Ensayos de información complementaria del hormigón*

*Los ensayos de información del hormigón pueden consistir en:*

- a) la fabricación y rotura de probetas, en forma análoga a la indicada..*
- b) la rotura de probetas testigo extraídas del hormigón endurecido, conforme a UNE-EN 12390-3. 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.*
- c) el empleo de métodos no destructivos fiables, como complemento de los anteriormente descritos y debidamente correlacionados con los mismos.*

En los “comentarios” de este mismo artículo se plantea mas pormenorizadamente, en qué casos concretos se recomienda este tipo de actuaciones (Ensayos de Información)

Respecto al Artículo 8.2.1 y 2 de la misma INSTRUCCIÓN EHE - 08, de condiciones ambientales, se especifica:

*8.2.1 Definición del tipo de ambiente*

*El tipo de ambiente al que está sometido un elemento estructural viene definido por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que está expuesto, y que puede llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a los de las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.*

*8.2.2 Clases generales de exposición ambiental en relación con la corrosión de armaduras*

*En general, todo elemento estructural está sometido a una única clase o subclase general de exposición.*

**1. ANTECEDENTES. INTRODUCCIÓN**

---

*En el caso de estructuras marinas aéreas, el Autor del Proyecto podrá, bajo su responsabilidad, adoptar una clase general de exposición diferente de IIIa siempre que la distancia a la costa sea superior a 500 m y disponga de datos experimentales de estructuras próximas ya existentes y ubicadas en condiciones similares a las de la estructura proyectada, que así lo aconsejen.*

En los “comentarios” de este mismo artículo, aparece el cambio de identificación del “ambiente” para obras localizadas a menos de 5000 m de la costa, donde se hace necesario considerar un ambiente IIIa.

Y precisamente de esa observación, se plantea una de las variables en el proceso de investigación en esta Tesis Doctoral: La posición – situación – localización del edificio, a más o menos de 500 metros de la costa marina. (No confundir con la condición de distinto tipo de ambiente, en obras situadas a más de cinco kilómetros – 5000 metros de la costa marina, que ya se ha citado).

Estas referencias normativas, que han evolucionado con el paso del tiempo, debido precisamente a que el legislador ha comprobado la importancia de contemplar los ambientes y su influencia en la ejecución de las estructuras de hormigón armado (INSTRUCCIÓN EHE), de cara a mejorar su durabilidad, supusieron en su momento uno de los conceptos de comprensión obligada y a tener en cuenta, cuando se inició el desarrollo de la presenta Tesis Doctoral.

# 2



## **2.- EL ESTADO DEL ARTE**

**2.1.- La técnica, su uso y los Laboratorios de Ensayo**

**2.2.- Otras Investigaciones: Disponibilidad bibliográfica**

**2.3.- Factores que influyen**

“Se hace necesaria la implicación del “técnico tradicional” como “estudioso” de las estructuras de edificación, en los nuevos aspectos y técnicas de investigación relacionadas con el hormigón armado”

El Autor

**2. EL ESTADO DEL ARTE**



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**2. EL ESTADO DEL ARTE**

---

**2.- EL ESTADO DEL ARTE.**

En este capítulo se efectúa una recopilación de datos e informaciones sobre el estado de la cuestión que nos ocupa, técnicas de realización, el uso, los laboratorios, la bibliografía existente, el estado actual del conocimiento, etc. Se pretende exponer un resumen general de lo que se ha hecho y se ha dicho hasta el momento, por parte de otros investigadores.

Para encuadrar el estado de la cuestión, se debe recordar los aspectos anteriormente expuestos, en cuanto a normativa en vigor, destacando las especificaciones de la INSTRUCCIÓN EHE – 08, actualmente en vigor, en lo relativo al “ambiente” y especialmente en su posición - situación - localización (a más o menos de 500 metros de la costa) y en lo referido a la durabilidad – vida útil de la estructura (relacionada con la edad), que son las dos variables estudiadas e investigadas en esta Tesis Doctoral.

Aspectos similares se recogen en la NEW EUROPEAN STANDARDS FOR CONCRETE, especialmente en las UK, EN 206: Concrete specifying y en la BRITISH STANDARD BS – 8500.

## **2. EL ESTADO DEL ARTE**

---

Es de destacar también el contenido de la norma DEUTSCHEN BETONNORMEN DIN 1045, con sus distintos aspectos relacionados con la durabilidad del hormigón, así como las BRITISH STANDARD – BS y las REGLES BAEL 99: TECHNIQUES ET CONSTRUCTIONS EN BETON ARMÉ, en la misma línea de las AMERICAN CONCRETE INSTITUT (ACI), donde se pone de relieve la importancia de la durabilidad (Muy relacionada con la localización de las estructuras, más o menos cercanas de la costa)

### **2.1.- La técnica, su uso y los Laboratorios de Ensayo.**

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, en aquel momento denominada e identificada como “INSTRUCCIÓN EH”, seguida de los dos dígitos correspondientes al año de su publicación, hasta llegar a la actual INSTRUCCIÓN EHE – 08 ya referida.

Es importante aclarar, en cuanto al estado del arte, que posteriormente se fue avanzado en las técnicas de realización de los ensayos y en su uso y aplicaciones, que con el paso del tiempo se ha ido generalizando.

Más adelante, supuso un avance importante la aparición de las Homologaciones de Laboratorios de Control de Calidad en la Construcción, en los años 70 en nuestro país, entonces denominados Laboratorios Homologados. Desde entonces hasta ahora, se han publicado sucesivas ediciones de la misma norma, que ha sido básica – imprescindible, en el desarrollo del conocimiento en materia de hormigón armado, en las estructuras portantes en edificación.

En este momento el estado del conocimiento se encuentra muy avanzado, en cuanto al uso de las conocidas técnicas de chequeo estructural, especialmente por la proliferación, en los últimos años, de los ahora denominados Laboratorios Acreditados, en manos de quienes se encuentran habitualmente los equipos de ensayo, para los procesos de chequeo, que se requieren como paso previo a comprobaciones – peritaciones estructurales y que se utilizan y analizan en la investigación, para el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

## **2. EL ESTADO DEL ARTE**

Se ha avanzado, sin embargo, muy poco en profundizar en la técnica de aplicación en sí y en el desarrollo de los equipos de ensayo. Se siguen utilizando los mismos equipos de perforación, extracción y toma de muestras, desde hace más de cuarenta años, (BERMÚDEZ Y ALEJOS, 2009). Esta es la situación actual y con estos medios se tiene que trabajar.

En general es conocido por todos los técnicos dedicados al mundo de la construcción, la existencia de distintos métodos para la realización de los trabajos “in situ” y los ensayos de laboratorio, necesarios para chequear una estructura de hormigón armado, de cara a un posterior análisis e investigación de su comportamiento estructural y como herramienta de partida, para una correcta peritación y/o diagnóstico estructural, (JONES, R., 1962).

### **2.2.- Otras Investigaciones: Disponibilidad bibliográfica.**

En cuanto a otros estudios anteriores, como conclusiones de todo lo investigado por el autor, previamente al inicio de esta Tesis, se había llegado a las siguientes conclusiones, que se presentan en *letra cursiva*:

- *Que el uso del esclerómetro presenta gran cantidad de limitaciones, no debiéndose utilizar en estructuras antiguas (donde ya se ha avanzado en el proceso de carbonatación superficial del hormigón), siendo exclusivamente apto, para la obtención de información comparativa, en caso de un elevado número de piezas a chequear y siempre con carácter orientativo, en nuevas estructuras.*
- *Que el equipo de ultrasonidos es muy útil para el conocimiento – estimación de la resistencia del hormigón, con un escaso margen de error, que nos facilita una información orientativa, apta para su comparación con la resistencia real del hormigón, obtenido del ensayo a compresión simple.*
- *Que la extracción de probetas testigo nos proporciona unos valores reales de la calidad del hormigón, no afectando al comportamiento estructural de la pieza (si se han seguido en su proceso, todas las indicaciones aquí expuestas) y que se pueden utilizar como valores estadísticos, sin necesidad de proceder a su realización en todas las piezas.*
- *Que los ensayos a compresión simple son de una gran fiabilidad (proceso de ensayo normalizado en los Laboratorios Acreditados), siempre que se disponga de adecuadas*



**2. EL ESTADO DEL ARTE**

---

*dimensiones de las probetas testigo de hormigón.*

- *Que el ensayo de Comprobación de la Profundidad de Carbonatación, con la aplicación de la fenolftaleína (muy simple en su proceso de ejecución) es de una alta fiabilidad, dándonos de forma inmediata una idea clara de la profundidad de carbonatación del hormigón y de ahí, la posible zona desprotegida de la armadura de la pieza.*
- *Que los ensayos de comprobación de la corrosión de armaduras, son de fácil aplicación, aunque no de gran exactitud en su resultado. No obstante hay que tener en cuenta que cuando se produce la pérdida de sección útil del acero, es claramente apreciable, en la simple inspección visual de un experto. Hay que destacar aquí que el aspecto que presenta este proceso es muy alarmante, pero que una vez limpia la superficie de la armadura, se comprueba que la pérdida de sección, en muchos de los casos puede considerarse despreciable.*
- *En cuanto a los ensayos de contenido de cloruros y contenido de sulfatos (procedimientos normalizados en los Laboratorios Acreditados), arrojan valores que no son decisivos, pero que nos aportan información en cuanto al contenido de partículas solubles que han podido afectar a la relación hormigón / acero y que pueden ser origen de focos de lesiones. Aunque es una interesante información, no es suficiente y no puede ser exclusiva para una adecuada toma de decisiones, en un chequeo para un diagnóstico estructural.*
- *En cuanto a los ensayos de determinación de la porosidad, la absorción de agua y de la densidad (también normalizada y muy experimentada en los Laboratorios Acreditados), arrojan valores cuyo uso servirá exclusivamente como comparativos y como ensayos de referencia. Nos van a dar luz en cuanto a la posible amenaza de dejar o mantener las armaduras desprotegidas y de ahí, facilitar el proceso de corrosión. También nos pueden dar idea del “nivel de calidad” de la puesta en obra del hormigón, a veces con un escaso/insuficiente vibrado. No obstante, insistimos en que los resultados obtenidos por sí solos, nunca podrán ser determinantes en un proceso de diagnóstico estructural.*
- *No debemos confundir en ningún momento, los valores de resistencia a compresión de hormigón fresco, con los valores de resistencia del hormigón obtenido del ensayo a compresión simple de probetas testigo de hormigón endurecido, a distintas edades: Requieren coeficientes de conversión como los ya indicados, basados en actuaciones experimentales, no avaladas por la normativa.*

## 2. EL ESTADO DEL ARTE

---

- *Se hace necesario incrementar el número de ensayos no destructivos (END o NDT), como el Análisis mediante Ultrasonidos (Velocidad) o el Análisis Esclerométrico (Índice de Rebote N) ya citados, para correlacionar con los valores de resistencia a compresión simple en probetas testigo y mejorar así la fiabilidad de los resultados finales.*
- *Se confirma que las correlaciones entre valores de Índice de Rebote, Velocidad Ultrasónica y Resistencia a Compresión, son más fiables en el tramo que el autor denominaba e identificaba en aquel momento, como “zona de certeza”, debiendo desestimar los valores extremos, en todas las determinaciones.*

Como conclusiones finales de ese primer período de investigación, el autor ya entendía que se había conseguido una sencilla herramienta muy útil, práctica, ágil y accesible a cualquier profesional, no habituado al uso de estas técnicas de inspección y de investigación, que le permitiera conocer, además de los equipos, métodos y técnicas disponibles, sus aplicaciones más concretas y sobre todo, analizando las distintas variables, poder llegar a conocer la mayor efectividad, eficacia y fiabilidad de sus resultados, para el uso que se le requiera en cada caso.

Se ha pretendido ahora, en este nuevo periodo de investigación, profundizar más en el análisis matemático - estadístico y en la búsqueda de los mejores criterios de correlación de valores y conseguir modelos con la máxima fiabilidad en el resultado final. Por ello, como continuación de aquel trabajo, con la experiencia del doctorando en chequeos de estructuras y con la disponibilidad de la gran cantidad de datos obtenidos de distintas obras y en sus distintas circunstancias, se dio inicio al desarrollo propiamente dicho, del nuevo proceso de investigación, que concluye con la presentación de esta Tesis Doctoral.

Por otra parte, queda claro, que el estado de la cuestión nos indica la existencia de un gran desconocimiento del uso en profundidad de estos métodos, por parte de los distintos profesionales, lo que se considera totalmente improcedente dado el estado actual de la técnica.

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.

**2. EL ESTADO DEL ARTE**

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 con que se ha trabajado en esta Tesis Doctoral, aunque sí existe alguna bibliografía (BISHR, H.A.M., 1995), 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), en la bibliografía nacional consultada (COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN), se recoge una orientación de resultados, para evaluar la “calidad del hormigón”, en función exclusivamente de los resultados de velocidad de ultrasonidos, que presentamos en la siguiente tabla:

Tabla n°2.1: Clasificación de la calidad del hormigón.

<b>VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/seg.)</b>	<b>CALIDAD DEL HORMIGÓN</b>
> 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

En la bibliografía internacional (GUIDEBOOK ON NON - DESTRUCTIVE TESTING. Vienna 2002), se encuentra la siguiente tabla de valores tipo de correlación de resultados (Tabla 2.2) para la “clasificación de la calidad del hormigón”, en función de los valores de velocidad de ultrasonidos (Como se ve, no se contemplan valores concretos de resistencia a compresión, por tanto se plantea una gran subjetividad):

**2. EL ESTADO DEL ARTE**

Tabla n° 2.2: Clasificación del hormigón.

<b>CLASSIFICATION OF THE QUALITY OF CONCRETE ON THE BASIS OF PULSE VELOCITY ULTRASONIC.</b>	
<b>LONGITUDINAL PULSE VELOCITY (m/seg)</b>	<b>QUALITY OF CONCRETE</b>
> 4.500	EXCELLENT
3.500 – 4.500	GOOD
3.000 – 3.500	DOUBTFUL
2.000 – 3.000	POOR
< 2.000	VERY POOR

Fuente: GUIDEBOOK ON NON – DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURES. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. VIENNA 2002.

En cuanto a otros trabajos de investigación sobre estructuras de hormigón, se ha consultado una amplia bibliografía (los documentos más representativos se enumeran al final del presente documento), no habiendo encontrado ningún trabajo centrado en el chequeo estructural, en función de la edad del edificio y de su situación o localización geográfica, como ya se ha adelantado. Sin embargo, sí se han consultado documentos (L'HERMITE ROBERT, 2003), con objetivos de investigación distintos y de gran interés, destacando:

- Análisis de comportamiento estructural en función del tamaño del árido.
- Estudios de correlación a distintas temperaturas.
- Análisis experimentales, con distintos tipos de cemento.
- Importancia de la presencia de armaduras en el procedimiento de ensayo, tamaño de probetas, etc.
- Relación corrosión/durabilidad/resistencias, etc.
- Influencia de la porosidad, absorción, humedad, etc.
- Influencia del tamaño de las probetas.

En cuanto a las posibilidades de futuro, ese es el fundamento del estado de la cuestión: Ahí es donde están las posibles alternativas de avance en la investigación y en el desarrollo de futuros proyectos de investigación, aplicando a estos métodos de ensayos, con su debido estudio, análisis y una adecuada divulgación, en la que hemos tratado de basar otro de los fundamentos de nuestra Tesis Doctoral.

## **2. EL ESTADO DEL ARTE**

---

### **2.3.- Factores que influyen.**

En las tablas anteriormente expuestas, en las que claramente se ve la inspiración de una a otra, la primera extraída de la bibliografía nacional y la segunda, de la bibliografía extranjera, no se ha podido determinar cuál de las dos fue la primera, ni el tratamiento de los datos para llegar a su confección, ni la fiabilidad de su resultado final. No obstante, es muy común y frecuente su uso, por parte de algunos técnicos especialistas españoles, pero sin duda, arriesgada su interpretación porque su enfoque y tratamiento es muy superficial.

No se debe olvidar que como ya se ha dicho con anterioridad y se debe seguir insistiendo, 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), incluso las condiciones climáticas, afecciones por heladas (HOLA, J., SCHABOWICZ, K. y STAWISKI, B. del Institute of Building Engineering. Poland, 2003) o afecciones por elevación de la temperatura en caso de incendio. (GRUBBS and BECK, 1972).

Todo ello, 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, aplicando las teorías y formulaciones a las que se ha llegado y que se presentan como conclusiones de esta Tesis Doctoral. Se trata entonces de demostrar en esta tesis, que se puede establecer un procedimiento, para conseguir la más adecuada correlación.

Por ello, el doctorando que suscribe, entiende y se justifica sin duda alguna, que se obtienen resultados finales mucho mas ciertos y mucho más fiables, con el uso de las fórmulas,

**2. EL ESTADO DEL ARTE**

---

expresiones matemáticas y gráficos de correlación, que se plantean en las conclusiones de esta Tesis Doctoral, 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.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# 3

## **3.- METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

**3.1.- Planificación de los trabajos**

**3.2.- Las técnicas: Herramientas  
(Ultrasonidos, Profómetro, Probetas Testigo, etc.)**

**3.3.- Los casos más frecuentes**

**3.4.- Metodología estadística**

“Ningún hombre de temperamento científico afirma que lo que ahora es creído en ciencia, sea exactamente verdad: afirma que es una etapa en el camino hacia la verdad”

Bertrand Russell



**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

**3.- METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA.**

Para el desarrollo del proceso de investigación de esta Tesis Doctoral, se ha seguido una clara metodología, basada en tres aspectos:

- Realización de ensayos.
- Recopilación de información.
- Tratamiento estadístico de los datos.

En cuanto a la recopilación de información, se ha contado con los necesarios resultados de los “ensayos de información” generados por:

- Análisis mediante ultrasonidos.
- Extracción de probetas testigo.

El ámbito geográfico que se ha considerado en esta investigación, ha sido la franja mediterránea,

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

desde Barcelona hasta Almería.

Con los resultados de estos ensayos se procedió a su tratamiento estadístico, con la siguiente secuencia:

- Recopilación de datos.
- Análisis del total de la muestra (185 Probetas Testigo).
- Análisis del total de la muestra definitiva (180 Probetas Testigo).
- Análisis de los subgrupos o familias de tipos de estructura, según las variables de localización (L1 y L2) y de edad (E1 y E2).
- Análisis de los subgrupos estructurales, con las dos variables combinadas (Edificios tipo A, B, C y D).
- Discusión de los resultados, para la posterior emisión de las conclusiones.

Se trata así de la aplicación del método inductivo – deductivo, con apoyo inicial de métodos instrumentales (ensayos “in situ” y de laboratorio), donde se plantea un proceso lógico, secuencial, encadenado, definiendo distintos modelos que permitan “predecir el futuro”, con distintas propuestas de actuación, para una adecuada gestión de los chequeos estructurales, en elementos de hormigón armado.

Un trabajo de esta profundidad necesita una adecuada secuencia metodológica, tanto en los procesos de ensayo propiamente dicho, como en el análisis de los datos y de los resultados obtenidos y en el posterior tratamiento de los datos para su correlación, así como en su interpretación final y en la emisión de conclusiones. A continuación se desarrollan estas etapas.

#### **3.1.- Planificación de los trabajos.**

La presente Tesis Doctoral nace como consecuencia del resultado de anteriores investigaciones del doctorando, en las que se había trabajado sobre las siguientes técnicas de inspección y de chequeo de estructura de hormigón:

- Análisis esclerométrico.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- **Análisis mediante ultrasonidos.**
- Comprobación de la corrosión (Pérdida de sección útil de acero).
- Profundidad de carbonatación.
- **Extracción de probetas testigo (Compresión Simple).**

No se pretendía entrar en el proceso de diagnóstico propiamente dicho, que excedía del objeto de esa actuación, sino simplemente en las técnicas de chequeo previo, para la obtención de los datos necesarios en el posterior diagnóstico estructural.

Las fuentes de consulta que se utilizaron en su día y de las que se obtuvo la primera información de partida, fueron:

- Centros de Documentación.
- Bibliotecas Públicas.
- Biblioteca Universitaria.
- Biblioteca propia del alumno.
- Bibliografía Inglesa (ASLIB DIRECTORY LONDRES).
- Dirección General de Investigación Científico – Técnica del Ministerio de Educación, Política Social y Deporte.
- REBUIN: Red de Bibliotecas Universitarias.
- Instituto de Información de Ciencia y Tecnología (IICY T).
- Laboratorios Acreditados.
- Laboratorios Especializados.
- Proveedores de materiales, equipos de ensayo e instrumentación de laboratorios.
- Entrevistas con usuarios y técnicos de laboratorio.
- Páginas varias de Internet.

Todo ello sirvió de herramienta para el desarrollo de las primeras investigaciones centradas en los dos métodos de ensayo, que han supuesto el desarrollo final de este trabajo de investigación, basado exclusivamente en la correlación de resultados obtenidos de los dos siguientes ensayos:

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- **Análisis mediante Ultrasonidos** (Obtención de la velocidad de transmisión, de propagación de la onda ultrasónica, medida en m/seg.).
- **Extracción de Probetas Testigo de Hormigón** (Para el posterior Ensayo a Compresión Simple y la obtención de la Resistencia Real del hormigón, expresada en Mpa).

En base a los resultados obtenidos de ambas técnicas, se procede a efectuar la necesaria correlación, hasta llegar al resultado más certero, que se está buscando, de cara a conseguir la mayor fiabilidad en el análisis del comportamiento estructural de los elementos de hormigón armado analizados.

Llegados a ese punto, se inicia una labor de recopilación de datos como resultado de estos ensayos, realizados en distintos Laboratorios Acreditados de la zona geográfica elegida (inicialmente la Costa Mediterránea).

Para ello, el doctorando contactó con más de treinta Laboratorios Acreditados, localizados en distintas ciudades de la banda costera mediterránea, desde la ciudad de Barcelona hasta Almería.

Como resultado de estos contactos se llegó al conocimiento de distintas circunstancias, que aunque ajenas al objeto principal de esta investigación, se considera de interés, entre las que se enumeran las siguientes:

- En Cataluña, no es habitual la realización del análisis mediante la comprobación de la Velocidad por Ultrasonidos, para la posterior extracción de Probetas Testigo. Habitualmente las eligen aleatoriamente y excepcionalmente, lo complementan con el conocido Análisis Esclerométrico.
- Las mismas circunstancias se dan en gran parte de los Laboratorios Acreditados localizados en la provincia de Almería.
- Similares actuaciones se encuentran en los Laboratorios Acreditados localizados en la provincia de Castellón.
- En el resto de la Comunidad Valenciana y en la Región de Murcia, sin

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

embargo, sí es habitual el uso de ambas técnicas de chequeo estructural y con los mismos criterios de actuación, con la correlación final de sus resultados.

Se han manejado datos fiables de resultados de ambas técnicas de ensayo, hasta llegar a obtener valores de Velocidades de Propagación de Ultrasonidos (V), mediante el análisis de más de dos mil piezas de hormigón y valores de Resistencia Real del Hormigón (R), procedentes del resultado del ensayo a compresión simple en laboratorio, de ciento ochenta y cinco probetas testigo (185 unidades).

#### **3.2.- Las Técnicas: Herramientas.**

Se dispone por tanto, de dos grandes grupos de herramientas para el desarrollo de un chequeo estructural, en una labor previa al diagnóstico o evaluación de la calidad de una estructura de hormigón armado, tras una necesaria toma de datos previa:

- Ensayos “in situ” (Ultrasonidos y extracción de probetas testigo de hormigón)
- Ensayos de laboratorio (compresión simple de las probetas testigo).

Por su especial interés en el procedimiento, a continuación se desarrollan, de forma esquemática, cada uno de estos apartados, tras recordar los primeros pasos para la toma de datos.

Previamente al inicio de los trabajos de investigación, se hace necesario realizar una serie de trabajos de inspección en la propia obra (ALCAÑIZ MARTÍNEZ, J.H., 2009), para plantear una adecuada toma de datos:

- Disponibilidad de planos del edificio.
- Levantamiento de nuevos planos.
- Localización de lesiones.
- Localización de puntos de chequeo.
- Apertura de catas en terreno junto cimentación de hormigón.
- Apertura de catas en elementos estructurales.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- Identificación de la posición de toma de muestras.
- Colocación de testigos de yeso de seguimiento de movimientos.
- Inspección micrométrica (Lupa micrométrica o tarjetas micrométricas).
- Comprobación de diámetros de armadura.
- Es necesaria una gran fiabilidad en la toma de datos.
- Generar una completa Documentación Fotográfica, como complemento a todo el procedimiento.

Por brevedad y al salirse del objeto principal de esta Tesis Doctoral, no procede insistir en estos primeros pasos, centrarse en los trabajos propios de investigación, para lo que analizaremos las siguientes herramientas de trabajo:

- Análisis mediante la Determinación de la Velocidad de Ultrasonidos (V).
- Análisis Profométrico (Localización de armaduras).
- Extracción de Probetas Testigo de Hormigón endurecido.
- Ensayo a Compresión Simple en Laboratorio (R).

Se complementan estas actuaciones con la necesaria y fiable interpretación de resultados, en la que ya se ha insistido, que llevan a la redacción y emisión de las conclusiones del chequeo estructural de cualquier inmueble a estudiar. (ALCAÑIZ MARTINEZ, J. H. Diagnóstico de Edificios, 2005).

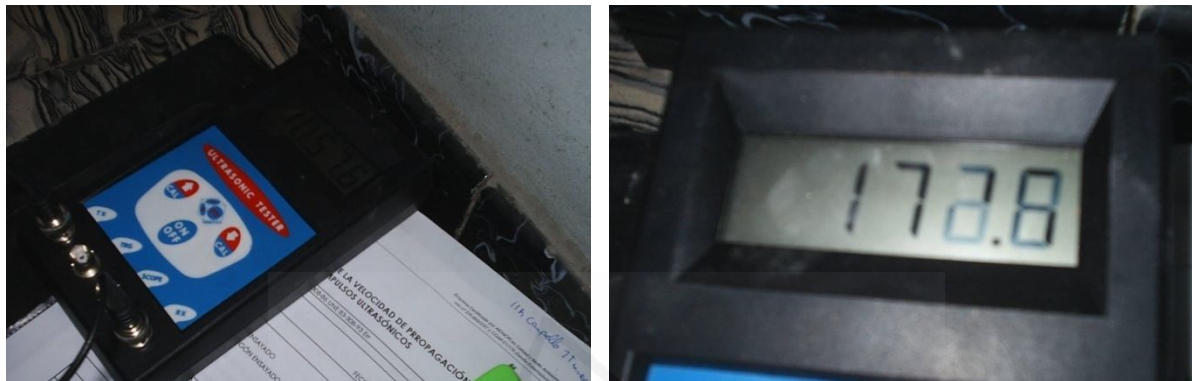
Se procede ahora a describir cada una de estas herramientas, su uso, aplicaciones más frecuentes, limitaciones del método, etc.

**Análisis mediante ultrasonidos.**

La velocidad sónica está determinada por la densidad de los materiales, la resistencia mecánica, oquedades, discontinuidades, medida a través del tiempo que tarda en transmitirse la onda entre dos puntos a una distancia determinada. Para su interpretación se tiene en cuenta que los valores más altos de velocidad, determinan una mayor densidad y compacidad del material (FACAOARU, I. y LUGNANI, C., 1993).

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

Este ensayo se realiza con un equipo (ver fotografías nº 3 y 4), que mide el tiempo de recorrido de una onda ultrasónica dentro del hormigón, entre un transductor emisor y un transductor receptor, acoplados al hormigón que se ensaya. La velocidad de propagación obtenida tiene una relación directa con los parámetros elásticos del material e indirecta, con las propiedades resistentes (DOMINGO, R – HIROSA, S. 2008).

**Fotografías nº 3 y 4****Ensayo de Ultrasonidos.**

Izquierda: Detalle del proceso de toma de datos del ensayo de aplicación de ultrasonidos en una pieza de hormigón armado. Veáanse los estadillos de apoyo, que nos permite efectuar un riguroso control de la toma de datos, para garantizar su fiabilidad.

Derecha: Detalle del proceso de auscultación de un pilar de hormigón, mediante la técnica de Analisis por Ultrasonidos. Veáse la pantalla digital que nos permite leer el valor de la velocidad de propagacion de la onda, a través del hormigón objeto de investigación.

Este método, no destructivo, es económico y sencillo y tiene la ventaja respecto al Esclerómetro, que la medida afecta a toda la masa interior del hormigón y no solo a la cara exterior de la pieza. (RODRIGUEZ GONZÁLEZ, M., 1999).

Aparte de las aplicaciones ya comentadas, el ultrasonido se utiliza también para detectar discontinuidades internas, tanto en la calidad de los materiales en sí, como en el caso de presencia de grietas, fisuras, coqueras y otras irregularidades en el interior del elemento de hormigón armado objeto de chequeo, así como otros aspectos relacionados con la durabilidad. (HENRY, J. L., 2009).

Este mismo método de evaluación de la calidad del hormigón, ha sido utilizada por otros investigadores (LOUIS, M., PRADO, R., SPAIRANI, Y. y GARCÍA E. M., 2008), para la



### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

evaluación de la calidad de los materiales pétreos, con resultados muy fiables y con clara aplicación en estudios de patología del patrimonio edificado, reduciendo el efecto negativo, de los ensayos destructivos (Extracción de probetas testigo).

Entre los factores que afectan a la lectura de la velocidad de impulso ultrasónico, como complemento y ampliación a los ya comentados, destacamos e insistimos en los siguientes aspectos:

- Las fisuras perpendiculares a la línea de propagación.
- La presencia de armaduras.
- El grado de humedad.
- El tamaño de los áridos.
- El contacto entre los transductores y la superficie del hormigón.
- La distancia entre transductores.
- Otros aspectos varios no controlados.

Es por ello recomendable (imprescindible, se debería afirmar) que tome siempre las lecturas de ultrasonidos, un técnico especializado, capaz de interpretar la situación concreta con que se encuentra en la obra – estructura, objeto de chequeo. (GUIDE EXISTING STRUCTURES, B. S. I. 1981). Ver fotografía nº 5.



**Fotografía nº 5**  
**Dimensión Pilares.**

Comprobación de la dimensión del pilar, previamente a la aplicación del equipo de ultrasonidos, para su posterior aplicación a la velocidad de transmisión de la onda ultrasónica.

De todos los factores que afectan al resultado del ensayo, tiene especial interés la edad del hormigón, ya que parece sabido y demostrado (HENRY, J. L. 2009), que la velocidad de propagación se ve poco alterada a partir de los 28 días y por tanto, la estimación de la resistencia

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

se hace más imprecisa con el tiempo y es cuestionada por numerosos autores (MIRALLES Y VERGARA., 1999), por lo que ha sido la edad (mayor o menor de veinte años) otra de las variables elegidas en el desarrollo de esta investigación, además de su localización – situación – posición relativa respecto a la costa.

#### El Método.

El principio del método ultrasónico consiste en la aplicación de una impulsión de vibración longitudinal, producida mediante un transductor electro-acústico, que es aplicado sobre una de las caras del elemento de hormigón que se desea ensayar (Ver fotografías nº 6 y 7). Después de haber franqueado una longitud (L) en el hormigón, (Ver fotografía nº 5), la impulsión vibratoria es convertida en una señal eléctrica, con la ayuda de un segundo transductor electro-acústico y la base de tiempo electrónico, permite medir el tiempo de propagación (T). La velocidad del impulso (V) viene dada por:

$$V = L / T$$

De una forma general, el principio del chequeo ultrasónico se basa en la correlación existente entre la calidad del hormigón y la velocidad de propagación de un tren de vibraciones mecánicas amortiguadas a través del material. (DOMINGO, R. y HIROSE, S., 2008).



#### Fotografías nº 6 y 7

##### Realización análisis mediante ultrasonidos.

Izquierda: Detalle del proceso de auscultación de un pilar de hormigón, mediante la técnica de Analisis por Ultrasonidos. Véase la pantalla digital que nos permite leer el valor de la velocidad de propagacion de la onda, a través del hormigón objeto de investigación.

Derecha: Detalle del proceso de auscultación de un pilar de hormigón, mediante la técnica de Analisis mediante Ultrasonidos. Véanse los palpadores de emisión / recepción de la onda.

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

Las medidas – comprobaciones, pueden ser realizadas con cualquier equipo ultrasónico, de los que existen en el mercado en la actualidad. Estos equipos se caracterizan por la frecuencia en los palpadores en Kilohercios (KHz), con capacidad de apreciar la exactitud de tiempo que tardan las ondas de choque producidas en la superficie de un hormigón por un emisor, para atravesar la masa de hormigón y llegar al captador. Existen tres modos para la realización de estas medidas, que son:

- Transmisión directa, aplicando los transductores sobre las dos caras opuestas del elemento a ensayar.
- Transmisión semidirecta, aplicando los transductores sobre dos caras contiguas y ortogonales del elemento a ensayar.
- Transmisión superficial, aplicando los transductores sobre una misma cara del elemento a ensayar.

La transmisión directa es la forma más habitual de efectuar las mediciones, obteniéndose los resultados más fiables y ha sido la utilizada en todos los casos estudiados en el proceso de investigación de esta Tesis Doctoral.

Para realizar el chequeo ultrasónico en elementos como soportes y jácenas, si el hormigón no presenta las caras vistas, se deben realizar previamente unas calas, en las caras opuestas de estos elementos, para poder acoplar directamente los palpadores sobre el hormigón y no sobre revocos, revestimientos u otros acabados, que deben ser retirados previamente. (HERNÁNDEZ, IZQUIERDO Y OTROS, 2010).

De cara a mejorar la uniformidad y representatividad de los datos, el número de calas realizadas en cada soporte deben ser al menos de tres parejas, una en la parte inferior, otra en la parte superior y otra en el centro, con el fin de tomar lecturas en cada uno de esos niveles, para luego obtener la media aritmética, como valor más representativo del conjunto de la pieza ensayada (GUIDEBOOK NON - DESTRUCTIVE TESTING, Atomic Energy Agency, Viena 2002).

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA****Aplicación específica del ultrasonido, para caracterizar la durabilidad del hormigón.**

Como complemento a este proceso de investigación, teniendo en cuenta la importancia del concepto de “durabilidad”, ampliamente recogido en la distinta normativa consultada (AMERICAN CONCRETE INSTITUT - ACI, Norma Europeas - NEW EUROPEAN STANDARDS FOR CONCRETE, a las BRITISH ESTANDARD – BS, a las DEUTSCHEN BETON NORMEN – DIN/EN, a las REGLES BAEL 99: TECHNIQUES ET CONSTRUCTIONS EN BETON ARMÉ y especialmente en la INSTRUCCIÓN EHE - 08 de obligado cumplimiento), se quiere relacionar el ensayo de ultrasonidos (base de esta Tesis) con la durabilidad de nuestra estructura de hormigón.

En distintos trabajos de investigación, se ha comprobado que el deterioro prematuro en las estructuras de hormigón, debido a la acción ambiental, requiere procedimientos para estimar la durabilidad de este tipo de componentes (JONES, R. y FACAOARU, I., 2007). La durabilidad está relacionada con la porosidad, que determina la intensidad de las interacciones del material con los agentes agresivos. En esas investigaciones se plantean métodos no destructivos, mediante ultrasonidos, para caracterizar la porosidad del hormigón estructural, que se relaciona con la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas a través del material, al partir de la base de considerar que el hormigón está claramente formado por parte sólida y poros (MICHAELS AND JOHNSON, 1993).

**Fotografías n.º 8 y 9****Profundidad de carbonatación.**

Izquierda: Detalle del proceso de aplicación de la disolución de fenolftaleína, para la comprobación de la profundidad de carbonatación, en una probeta de hormigón en el laboratorio, previamente a su ensayo a Compresión Simple. Véanse las señales de control y medición, dentro de nuestro proceso de investigación.

Derecha: Detalle del proceso de aplicación de la disolución de fenolftaleína, para la comprobación de la profundidad de carbonatación “in situ”, inmediatamente finalizada la extracción de la probeta testigo de hormigón.

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

La mayor parte de los procesos que afectan a la durabilidad del hormigón, están relacionados con su estructura porosa, que determina la intensidad con la que se desarrollarán las interacciones del hormigón, con el ambiente que le rodea (Ver fotografías nº 8 y 9). La existencia de poros y capilares en el interior del hormigón facilita los procesos destructivos, que generalmente comienzan en la superficie. Los agentes agresivos son transportados a través de la estructura porosa, constituida por canales, poros y fisuras de distintas dimensiones (MIRALLES Y VERGARA, 2002).

La velocidad acústica ha sido usada frecuentemente como indicativo de las características mecánicas de los materiales. La medida de la velocidad de propagación se realizó sobre las probetas de cada grupo, mediante dos transductores operando en transmisión, en seco, utilizando un acoplante de caucho. Se observa que la velocidad de propagación es un parámetro capaz de discriminar los grupos de probetas con diferentes porcentajes de relación agua / cemento (MICHAELS AND JOHNSON, 2005).

#### **Procedimiento de empleo.**

Como ya se ha indicado, el análisis ultrasónico consiste en la transmisión de ondas mecánicas de una frecuencia mayor de 20.000 Hz a través de un sólido. Estas ondas son producidas por un transductor generador y recibidas por un transductor receptor, así que cualquier Interferencia que las desvíe producirá un mayor recorrido o reflexión de las mismas, lo que sería indicado necesariamente en el equipo de medición, el cual convierte la energía mecánica en un impulso eléctrico que es digitalizado como tiempo de transmisión de la onda. Es claro que ya que disponemos de las dimensiones de los elementos en estudio, es posible obtener la velocidad de transmisión de onda, que en definitiva, será el parámetro de comparación para determinar la condición física o calidad del material en estudio, en este caso para obtener la velocidad de transmisión, que se va a correlacionar con los valores de resistencia a compresión de probetas testigo de hormigón (FACAOARU, I. y JONES, R., 2007).

El impulso ultrasónico se produce en un transductor a través del medio o sólido por analizar y es recibido por otro transductor el que convierte el impulso en una señal eléctrica (Ver fotografías nº 10 y 11). Normalmente la máxima energía se obtiene cuando se coloca el transductor normal a



### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

la superficie del elemento por analizar, aunque existen dispositivos para realizar tal operación en otros sentidos. Las aplicaciones del Análisis Ultrasonico se pueden usar además para los siguientes casos: Determinación de la homogeneidad del hormigón, determinación de vacíos, grietas u otras irregularidades, cambios en la resistencia con el paso del tiempo, estimación del módulo elástico dinámico del hormigón, determinación de espesores afectados en el hormigón, en caso de haber sido expuesto al fuego y otros deterioros localizados en el hormigón (SCHABOWICZ K. y STAWISKI, B., 2006).

En todos los casos anteriormente citados, se debe medir la velocidad ultrasónica con una gran precisión (+ 2 % entre resultados en una misma pieza o elemento ensayado) ya que los cambios en la misma, podrían ser indicaciones de cambios fuertes en la calidad del hormigón. Es imprescindible asimismo, contar con un adecuado contacto entre el transductor y la superficie/pañó del elemento por analizar, debiéndose en general emplearse grasa – gel en dicho contacto, tal que se garantice un adecuado acople, sin presencia de vacíos, hasta que se obtenga un valor mínimo y constante.



#### **Fotografías nº 10 y 11**

##### **Análisis mediante ultrasonidos.**

Izquierda: Proceso de realización de una comprobación mediante el Análisis de Ultrasonidos, por parte del doctorando, para comprobar la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, en la que se basa uno de los ensayos cuyo resultado es objeto de correlación, en esta investigación.

Derecha: Otro detalle del proceso de realización de una comprobación mediante el Análisis de Ultrasonidos, por parte del doctorando, para comprobar la velocidad de propagación de la onda ultrasónica, en la que se basa uno de los ensayos cuyo resultado es objeto de correlación, en esta investigación.

Las limitaciones del método, además de las ya citadas, son debidas a la afección de la velocidad ultrasónica, que puede verse influenciada por variables ya conocidas, insistiendo en la rugosidad de la superficie, temperatura del medio, separación de los transductores, presencia de acero de refuerzo, contenido de humedad, edad del hormigón, etc., que deben tenerse en cuenta, para una

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

mayor fiabilidad en la posterior interpretación. (JONES, R. y FACAOARU, I., 2007).

**Análisis profométrico. Localización de armaduras.**

Previamente a la extracción de una Probeta Testigo, de una pieza o elemento de hormigón armado, es necesario conocer la posición de las barras de armar, para no ser afectadas en el proceso de extracción (Ver fotografías nº 12, 13, 14 y 15). Se localizan con los métodos electromagnéticos que se aplican con los instrumentos conocidos genéricamente como “Pachómetros” o “Profómetros”, para detectar la presencia y dirección de las barras de armar, en el interior de una pieza de hormigón armado, así como el espesor de su recubrimiento, el diámetro de las barras y su separación (ADDLESON, L., 2002). El funcionamiento y criterios de utilización e interpretación de los resultados de los instrumentos que se utilizan para medir el espesor del recubrimiento, dependen de la marca comercial de cada uno y de su alcance o precisión.

**Fotografías nº 12 y 13****Localización de armaduras.**

Dos detalles de la aplicación del análisis profométrico, en un pilar de hormigón, para detectar la posición de las armaduras, como paso previo a la realización del proceso de extracción de una probeta testigo de hormigón.

Otro método para la detección completa de armaduras, es utilizar radiografías de rayos gamma o gamma grafías, escasamente utilizadas en obras convencionales.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA****Fotografías nº 14 y 15****Análisis profométrico.**

Izquierda: Detalle del proceso de inspección con aplicación del profómetro de precisión, para la detección de la armadura, en el interior de una pieza de hormigón. Este equipo puede trabajar en cualquier posición en que se encuentre la pieza de hormigón objeto de estudio.

Derecha: Detalle de la aplicación del análisis profométrico, con un equipo mas simple y de menor precisión, en un pilar de hormigón, para detectar la posición de las armaduras, como paso previo al proceso de extracción de una probeta testigo de hormigón.

Como alternativa poco científica, pero avalada por la experiencia, en ocasiones es muy práctico picar ligeramente el hormigón en alguna zona que no dañe a la estructura, para comprobar directamente el diámetro de las armaduras. El pachómetro combinado con el picado de alguna zona de la pieza a investigar, suele dar buenos resultados (BLOEM, D. L., 2004).

El “profómetro” o “pachómetro” está diseñado para la inspección y/o verificación del acero en el interior – del hormigón, por medio de campo magnético producido por el equipo, se miden las variaciones debidas a un material magnético externo. La magnitud de esta variación es indicada en el instrumento, calibrado para leer el diámetro de la varilla de acero y la distancia del recubrimiento (R. METEL. INSTRUCTION).

La localización del acero tanto longitudinal como transversal, se realiza moviendo el palpador a lo largo de la cara del elemento a estudiar. El equipo indicará la máxima deflexión cuando se encuentre directamente paralela sobre el eje de la varilla de acero o del grupo de varillas. Posteriormente se determina el espesor o recubrimiento, así como en algunas ocasiones, el diámetro correspondiente de la varilla (GUIDEBOOK ON N. D. T. Atomic Energy Agency, Vienna 2002).

El equipo se puede usar para los siguientes casos: Localización de la barra de acero principal, así como la de los solapes y su longitud, localización del acero secundario, estribos y su



### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

espaciamiento, localización de tuberías, conductos metálicos, medición de espesores de recubrimientos, etc., teniendo en cuenta que las limitaciones del equipo hay que buscarlas en caso de recubrimiento máximo de 15 – 20 cm, dependiendo del diámetro del acero y en la disponibilidad de espacios abiertos en los elementos a estudiar. (BRECCOLOTTI y ROGARI, 2007).

#### **Profundidad de Carbonatación.**

La carbonatación, muy influenciada por la presencia de humedades (ver fotografía nº 16), es una alteración superficial del hormigón por acción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera, que implica una pérdida de su capacidad protectora (por su pH), sobre las armaduras y en nuestro país constituye una de las principales causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado (RODRIGUEZ GONZÁLEZ, 1999).



**Fotografía nº 16**

**Investigación previa a la extracción de un testigo.**

Detalle del proceso de inspección de una estructura de hormigón armado, objeto de investigación, dada la afección estructural por la presencia de corrosión de armaduras, por la influencia de la humedad, que en este caso asciende por capilaridad.

Esta afección al hormigón está íntimamente relacionada con una de las variables estudiadas en esta Tesis Doctoral, la situación – localización de la estructura, respecto a la costa (más o menos de 500 metros de la costa marina: Durabilidad), como indica la INSTRUCCIÓN EHE - 08.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA****Fotografías nº 17 y 18****Profundidad de Carbonatación.**

Aspecto general y detalle del proceso de comprobación de la profundidad de carbonatación “in situ” en el hormigón de uno de los pilares objeto de investigación, Véase la aplicación de la disolución de fenolftaleína sobre el hormigón afectado. Véase su profundidad que ha llegado a afectar a la desprotección de la armadura principal de un pilar, donde ya se ha iniciado el proceso de corrosión de las armaduras.

Para el hormigón armado, el fenómeno de carbonatación puede ser el origen de serios daños estructurales (Ver fotografías nº 17 y 18: Efecto de la corrosión). Gracias a la elevada alcalinidad que le confiere el cemento ( $\text{pH} > 12$ ), el hormigón protege al acero de la corrosión. La carbonatación reduce la alcalinidad ( $\text{pH} < 9$ ) y si el “frente de carbonatación” alcanza la zona de la armadura, comienza a oxidarse. Dado que la formación de óxido se acompaña siempre con un aumento de volumen, esto acarrea generalmente la disgregación del hormigón que cubre al acero, entonces la armadura deja de estar protegida y el hormigón armado comienza a perder su capacidad portante (BERMUDEZ M. A. y ALAEJOS, P. 2009).

**Fotografía nº 19 y 20****Profundidad de Carbonatación.**

Aspecto general y detalle del proceso de medición de la profundidad de carbonatación de una probeta testigo de hormigón. Veanse los 18 mm de zona de desprotección de armadura. Todo ello previamente al ensayo a Compresión Simple en prensa homologada, en el correspondiente Laboratorio Acreditado.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

Para que tenga lugar la carbonatación, es necesaria la presencia de humedad. La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa se encuentra entre el 50 y el 55 %. Si la humedad es menor, no hay suficiente agua en los poros del hormigón para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. Entre el 55% y el 75%, la situación se agrava progresivamente. Por encima del 75%, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente por la presencia del agua (HENRY, J. L. 2009).



**Fotografía n° 21**  
**Profundidad de Carbonatación.**

Otro detalle del proceso de medición "in situ" de la profundidad de carbonatación de una probeta testigo de hormigón, inmediatamente finalizada la extracción, previamente al ensayo a compresión. Veanse los 67 mm de zona de desprotección de armadura.

La profundidad de la capa superficial carbonatada o deslavada (Ver fotografías n° 19, 20 y 21), se denomina profundidad de carbonatación y la reducción del pH se hace visible por el cambio de color de un indicador apropiado. Como indicador más adecuado se utiliza una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico. Esta solución es incolora en pH inferiores a 8. Para valores de pH superiores a 9,5 se torna de color rojo púrpura. Entre 8 y 9,5 el indicador forma una coloración del rosa al rojo púrpura, según evoluciona el pH desde 8 a 9,5 (LONGMAN, NEVILLE, A. M., 1995).

La determinación se debe realizar sobre una porción de hormigón de la superficie del elemento objeto de estudio. La medida se debe efectuar siempre sobre una fractura fresca, ya que las superficies se carbonatan rápidamente, por lo que, si se van a extraer probetas testigos, que luego se ensayarán en el laboratorio, aparte de conservarlas en recipientes estancos y con el menor contenido de aire posible, posteriormente la medida se efectuará sobre la fractura seca de los testigos, ya en el propio laboratorio (INTEMAC, 1997).

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

También podemos realizar una cala en el elemento de hormigón en cuestión, para realizar la determinación de la profundidad de carbonatación (Fotografías nº 19 a 21), en este caso habrá que poner especial cuidado en limpiar exhaustivamente la cala realizada, con la finalidad de dejar la superficie libre de polvo u otras partículas, que pudieran conducir a unos resultados erróneos (BERMUDEZ M. A. y ALAEJOS, P., 2009).

Conseguida una fractura reciente y perpendicular a la superficie del elemento de hormigón objeto del estudio, se pulveriza la solución de fenolftaleína. Pasados unos minutos para que tome color el indicador, se mide el espesor de la capa incolora. Si la línea de cambio de color es ondulada, se toman valores en diez puntos y se indica la media aritmética y la profundidad máxima. Se debe realizar alguna medición en zonas como las esquinas o alrededor de áridos gruesos, en contacto con la superficie donde se esperan mayores profundidades de carbonatación, anotando también estos valores máximos. Si el color no es rojo púrpura sino rosado, se anota esta eventualidad, así como su profundidad y frecuencia. (ASTM – Testing drilled cores). Las fotografías son una ayuda complementaria muy valiosa en estas medidas, para dejar patente el resultado del ensayo.

La realización de estas comprobaciones, inmediatamente después de la extracción de la probeta testigo de hormigón y previamente al ensayo a Compresión Simple en el laboratorio, para obtener la resistencia real del hormigón de esa pieza o elemento estructural, nos van a dar una idea de la profundidad de alteración superficial de ese hormigón, relacionada con la influencia en la velocidad mediante ultrasonidos y de la resistencia real del hormigón, teniendo en cuenta que a mayor profundidad de carbonatación, mayor desprotección de las armaduras y menor resistencia final del elemento ensayado (HOLA, J. y SCHABOWICZ, K. 2006).

#### **Extracción de Probetas Testigo.**

El control del hormigón por medio de Probetas Testigo, extraídas con trépanos adecuados, es de gran interés para una información real de la calidad del hormigón de una estructura, tras realizar el correspondiente ensayo de la probeta a compresión simple, para el conocimiento de la Resistencia a Compresión del Hormigón (R).



**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

El elemento de hormigón perforado por la extracción de un testigo, sobre todo en pilares y jácenas, queda disminuido en su sección transversal. Cuando su calidad resulta suficientemente buena y no precisa de refuerzo, resulta necesario evitar el efecto del orificio y restituirle de la manera más eficaz su resistencia primitiva, rellenándolo de mortero ligeramente expansivo y de retracción controlada, con alguna adición de resina.

Para la extracción de las probetas – testigo, se utiliza como norma general, una perforadora rotativa, provista con brocas de 50, 75, 100, 125 y 150 mm. de diámetro, con corona de diamante, refrigerada con agua (REVUELTA CRESPO y GUTIERREZ JIMENEZ, 2009).

**Fotografías nº 22 y 23****Extracción del testigo.**

Izquierda: Otro aspecto general de proceso de extracción de una probeta testigo en un pilar de hormigón, objeto de peritación estructural, tras la realización de los pertinentes ensayos previos de Análisis mediante Ultrasonidos.

Derecha: Detalle de la corona de diamante refrigerada por agua, durante un momento del proceso de extracción de una probeta testigo, de un pilar objeto de chequeo estructural.

Previa a la extracción de estas probetas testigo de hormigón, se procederá a realizar un análisis profométrico, para detectar la posición exacta de las armaduras y evitar así su posible interferencia o corte (FERNANDEZ CÁNOVAS, M. 1977). Una vez extraídas las probetas, se procederá a su correcta identificación y señalización, a su perfecto embalado y referenciado, para transportarlas inmediatamente al Laboratorio Acreditado, para su ensayo a Compresión Simple, que se realizará con posterioridad en una prensa homologada, de activación de velocidad de carga automática, con diferentes capacidades de carga, según el tamaño de la probeta testigo y el tipo esperado de hormigón (HENZEL AND FREITAG, 1969).

Las probetas - testigo se extraen de aquellos elementos estructurales replanteados con anterioridad, según los resultados obtenidos previamente en el chequeo inicial de la estructura,

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

mediante cualquiera de los ensayos no destructivos conocidos y en este caso, mediante el Análisis por Ultrasonidos (MACGREGOR – CANADIAN, 1976), como se aprecia en las fotografías nº 22 y 23.

De acuerdo con los resultados que se obtengan en los trabajos de inspección e investigación previos, se procederá a continuación, a determinar los parámetros resistentes del hormigón, realizándose el siguiente proceso, al objeto de asignar valores individuales de resistencia a cada uno de ellos:

- En primer lugar se realizará un chequeo ultrasónico, asignando velocidades a cada uno de los elementos chequeados (V).
- En segundo lugar se agrupan los elementos por lotes en función de sus velocidades ultrasónicas.
- En función de ello, se deciden los elementos estructurales de los que se extraen las probetas-testigo.
- Se procede a realizar la correlación entre los valores de resistencias reales del hormigón mediante el ensayo a compresión simple (R) y los valores de velocidades obtenidas mediante ultrasonidos (V).
- Se plantea la recta - curva de regresión de la correlación (En este aspecto es donde fundamentalmente se incide en esta Tesis Doctoral).
- Posteriormente, a cada uno de los elementos ensayados mediante ultrasonidos, se le asigna una resistencia (Por tanto no es una resistencia real, sino una estimación estadística de la resistencia).
- Finalmente, para cada uno de los lotes establecidos, se determina, con las resistencias asociadas de sus elementos, su resistencia estimada.

Existen estudios sobre la evaluación de la resistencia de pilares y jácenas de hormigón armado por medio de probetas testigo, así como sobre el relleno de taladros producidos por la extracción de probetas - testigo y su influencia en la resistencia de los elementos de hormigón armado (BARTLET F. y MACGREGOR, J. 1994 y HENRY, J. L. 2009).

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

Sin embargo, no existe una guía clara sobre el procedimiento a seguir, ante una situación en la que se emplean probetas testigo para determinar la resistencia del hormigón. Por tanto, para poder tomar decisiones en base a estas actuaciones, no recogidas por la normativa en vigor, es muy recomendable que el procedimiento de actuación fuera acordado por todas las partes que puedan incurrir en responsabilidad al respecto, incluidos los encargados de la extracción y el laboratorio de ensayos, para evitar posteriores litigios. Se deben acordar entre otros, los siguientes aspectos:

- La necesidad del ensayo y su objetivo. En caso de tratar de determinar la resistencia potencial del hormigón en el suministro, la validez de los resultados del control de producción realizado con probetas estándar.
- La localización del hormigón bajo sospecha (mediante los registros de entrega, evaluaciones mediante técnicas no destructivas, etc.).
- La propuesta de los lugares de extracción, número y tamaño de los testigos.
- Otras determinaciones auxiliares: determinación de la densidad y porosidad de los testigos, historia de curado del hormigón en la estructura, etc.
- Los niveles de calidad requeridos por la especificación (resistencia del hormigón a pie de obra), por el proyecto (resistencia del hormigón “in situ”) y las acciones a tomar, si los resultados estimados a partir de los testigos son claramente superiores, menores o insuficientes para adoptar una decisión.
- Responsabilidad de cada una de las partes en lo referente a la ejecución del trabajo de chequeo y de diagnóstico, así como de futuras intervenciones de reparación y/o de refuerzo estructural.

En cuanto al tamaño, número de muestras, localización y procedimientos de extracción, es sabido, por lo general, que a mayor tamaño de la probeta testigo, mejores resultados, ya que cuanto mayor es la probeta, menor es la variabilidad introducida por el procedimiento de extracción y más fiables son los resultados. El tamaño ideal es el de probetas testigo de 150 mm de diámetro, con una esbeltez de 2, para no tener que introducir ningún coeficiente – factor de corrección de forma, con respecto a la resistencia determinada sobre las probetas estándar. Sin embargo, obtener probetas testigo de este tamaño no siempre es una opción practicable, ya que la probeta debe estar, en la medida de lo posible, exenta de barras de acero de refuerzo, lo cual no

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

es siempre posible con testigos de ese tamaño (BARTLET AND MACGREGOR, 1994). Las normas de referencia sugieren el empleo de testigos de 100 mm de diámetro, que es una opción válida para hormigones con un tamaño máximo de árido igual o inferior a 25 mm. Se acepta en general que la relación entre el tamaño máximo del árido y el diámetro del testigo debe ser mayor que tres (3) para poder considerar los resultados fiables (RUIJIE LIU. Diameter small cores, 1996).



**Fotografías nº 24, 25 y 26**  
**Probetas Testigo Refrentadas.**

Detalle de una serie de probetas testigo de hormigón, una vez talladas y refrentadas por ambas caras, preparadas para ser sometidas al ensayo a compresión simple en el Laboratorio Acreditado.

En los casos de estructuras densamente armadas, pueden emplearse testigos de un diámetro de 75 mm., si el tamaño máximo del árido es de 20 mm o menor (ver Fotografías nº 24, 25 y 26). Se han publicado datos referentes al muestreo, ensayo e interpretación de resultados en testigos con diámetros por debajo de los 50 mm., aunque en general, a menor diámetro, más baja es la resistencia y menor la precisión, lo que puede obligar a emplear un elevado número de testigos, para llegar a obtener un valor fiable (CALAVERA, APARICIO, DELIBES, GONZALEZ, 1975).

Otros autores (NASSER AHMED, 1995), estiman que para una determinación precisa de la resistencia, el número de testigos de 50 mm es del orden de tres veces mayor que el número de testigos de 100 mm de diámetro e informan de un coeficiente de variación del 28,9% para la resistencia estimada del hormigón “in situ” con testigos de 50 mm., frente al 19,5% correspondiente a testigos de 150 mm extraídos del mismo hormigón. Se aprecia claramente que la precisión de la resistencia estimada del hormigón de una estructura, aumenta con el número de probetas testigo.



### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

Algunas normas (BRITISH STANDARD – BS) sugieren que la evaluación de la resistencia del hormigón en una zona determinada, debe estar basada en los resultados de al menos nueve testigos de 100 mm de diámetro, mientras que la resistencia de un elemento estructural en particular, debe estimarse a partir de un mínimo de tres probetas testigo. Si el testigo es de 50 mm de diámetro, estos números deben triplicarse.

#### **Localización y extracción de las probetas testigo.**

Los puntos de extracción dependerán del propósito y objetivo del ensayo. Si se persigue estimar el efecto de una sobrecarga o fatiga en la estructura, un ataque químico, efectos del fuego, explosión o el envejecimiento por exposición, en la resistencia “in situ”, es recomendable definir el área afectada previamente, mediante algún tipo de ensayo NDT, como el método de aplicación del ultrasonidos, para posteriormente extraer los testigos tanto de la zona afectada como de un área sana a efectos de comparación (HERNÁNDEZ, IZQUIERDO, ANAYA y ULLATE, 2000).

De forma similar, si el objeto del estudio es la evaluación de un hormigón nuevo que no ha superado los criterios de aceptación en los trabajos de control convencional, la primera acción debería ser la de localizar esa partida de hormigón dentro de la obra, bien por medio de la información proporcionada por la documentación existente y por las aportaciones de información del personal implicado o bien por medio de ensayos previos no destructivos (NDT), de tal modo que las probetas testigo se extraigan únicamente del material en entredicho (NEVILLE AND HARLOW, 1995).

Se debe recordar también, que la altura de vertido afecta al grado de compactación y por tanto a la densidad del hormigón, por lo que la resistencia del hormigón en la base de un pilar o de un muro puede ser hasta un 25% mayor que en la parte superior, debido a la segregación experimentada durante el vertido o por el asentamiento posterior del hormigón, sin entrar a valorar aquí la influencia del vibrado o curado del hormigón, en su puesta en obra. Por esta razón debe evitarse extraer testigos de las zonas extremas o singulares del elemento a ensayar (JIMENEZ, MESEGUER, MONTTOYA, 2005). Del mismo modo, es muy probable que el hormigón de los primeros cinco centímetros de recubrimiento haya experimentado unas condiciones de curado muy distintas a la del hormigón del núcleo central del elemento (HOLA,

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

J. y SCHABOWICZ, K., 2006). Por tanto, estos cinco primeros centímetros deberán eliminarse mediante el tallado de la probeta testigo, antes del ensayo, en el propio Laboratorio Acreditado.

Como guía de referencia obtenida de la consulta de la distinta bibliografía al respecto (REVUELTA, D. y GUTIÉRREZ, J. P. CSIC, 2009), podríamos plantear el siguiente esquema, como complemento a la investigación llevada a cabo en esta Tesis Doctoral:

Evaluación de la resistencia “in situ”:

- Desde un testigo por punto a evaluar
- Precisión de  $r12/\sqrt{n}$  %
- $n$  (número de testigos) se incrementa para reducir la región de incertidumbre

Localización de los testigos para la evaluación de la resistencia “in situ”:

- Cualquier punto en el hormigón evaluado.
- Omitir los primeros 50 cm o 1/5 de la altura del elemento, cualquiera que sea mayor.

Evaluación de la resistencia a pie de obra:

- Cuatro testigos por zona a evaluar.
- Precisión del 15 %.
- Al compararlo con la especificación, siempre se debe tener en cuenta el 15% de incertidumbre.

Localización de los testigos para la evaluación de la resistencia a pie de obra:

- Cada testigo debe ser representativo de la misma cantidad de hormigón bajo sospecha
- Omitir los primeros 50 cm o 1/5 de la altura del elemento, cualquiera que sea mayor.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- Evitar la inclusión de barras de refuerzo.

Por otra parte, la orientación del testigo respecto a la dirección de hormigonado también es un factor a tener en cuenta, ya que introduce variaciones. La resistencia de testigos extraídos en la dirección de hormigonado es del orden de entre un 5% y un 8% superior a la de los extraídos en dirección horizontal.

A la hora de decidir la localización de la extracción, como ya se ha indicado, es imprescindible la inspección de la zona mediante el “profómetro” o “pachómetro” (Ver fotografías nº 12 a 15), con objeto de elegir los puntos de extracción, evitando la presencia de barras de refuerzo. La localización final y el tamaño de los testigos, dependerá en muchas ocasiones del tamaño de la pieza a ensayar, del diámetro de las barras de acero de armar y de su separación.

La extracción debe realizarse siempre por personal experimentado, con un equipo de perforación refrigerado con agua, con coronas de corte diamantadas (GUIDE TO ASSESSMENT, 1981). El bastidor se fija habitualmente a la pieza de hormigón mediante tornillos de anclaje y se debe prestar una especial atención a la velocidad de giro y avance de la corona, para asegurar que el testigo se extrae en la dirección perpendicular a la superficie. El testigo se desprende una vez calado mediante un cincel introducido en el anillo aserrado por la corona, golpeándolo ligeramente, de tal forma que se produzca la rotura del material por el extremo final taladrado. Una vez que las muestras se han cortado, se deben identificar con un número de referencia, la dirección de extracción y la localización exacta dentro de la estructura y deben envolverse en un film impermeable, adecuadamente protegido (BUNGEY, 1979).

Las normas de referencia no establecen otros requerimientos antes del ensayo a compresión simple, salvo la mera inspección visual para identificar posibles anomalías, desperfectos o deterioros, así como la medición del testigo para determinar el diámetro, longitud y localización y en su caso, aunque no deseable, el diámetro de las barras de acero embebidas.

No obstante, en la bibliografía existente, consultada por este Doctorando y tenida en cuenta en todos los casos de su propia experiencia profesional, se incluyen además los siguientes requerimientos:

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- Inspección visual sobre el estado de compactación, presencia de poros, armaduras, coqueras, fisuras o indicios de segregación del hormigón, tipo de árido grueso y forma de las partículas.
- Determinación de la porosidad del hormigón extraído.
- Medida de la masa y la densidad del testigo por inmersión, tras su conservación en balsa de agua.
- Examen de la homogeneidad entre los distintos testigos extraídos de una misma zona.
- Impresión sobre la granulometría de los áridos: continua o discontinua.
- Esquema de la localización de los posibles defectos con respecto a la geometría general del testigo.

Si los testigos van a emplearse para estimar la resistencia del hormigón a pie de obra, es recomendable ensayarlos en condición de saturación. Se estima que la inmersión durante 40 horas de los testigos en balsa de curado, con agua a temperatura controlada de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , es suficiente para saturar la mayor parte de los poros del testigo (SOLÉ ALBERT, 1979).

Sin embargo, si la investigación busca conocer la resistencia del hormigón “in situ” en elementos que van a permanecer secos en su condición habitual de servicio, entonces resulta más apropiado secar los testigos, previamente al ensayo a compresión simple. La densidad y la porosidad pueden calcularse siguiendo el siguiente procedimiento:

- En el caso de que los testigos vayan a refrentarse, una vez tallada la probeta, para darle las dimensiones adecuadas, se sumergen en agua. En el caso de que el testigo se pula, esta operación se realizará tras el pulido.
- Transcurridas 40 horas, se deja secar el testigo hasta que no se observa humedad en la superficie, se pesa al aire en condiciones de saturado con superficie seca ( $M_{ss}$ ) y se determina el volumen ( $V_t$ ) inmediatamente después, mediante pesaje hidrostático o por desplazamiento de agua.
- Si el testigo lleva embebida alguna barra, debe extraerse y conservarse tras el ensayo a compresión, determinando su masa ( $M_r$ ) y volumen ( $V_r$ ) por pesaje hidrostático o desplazamiento de agua.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- En el caso de que se decida conocer la resistencia del hormigón en condición seco, tras la determinación de la densidad de los testigos saturados se secan durante 48 horas en estufa a 50°C. Una vez transcurrido ese tiempo, se pesa el testigo (Ms) y se determina su densidad.
- Si se conocen las densidades de los testigos tanto en condición de seco como en condición de saturado, se pueden calcular el coeficiente de absorción de agua aparente y la porosidad aparente del hormigón respectivamente.
- Aunque el porcentaje de poros en exceso no puede calcularse directamente a partir de los resultados de absorción y porosidad, sí que son un indicio de posibles defectos debidos a una mala compactación del hormigón. Valores típicos de absorción de agua aparente para un hormigón de unos 25 MPa de resistencia, bien compactado, varían entre el 7,5% y el 9%, y porosidades entre el 10% y el 15%. Hormigones mal compactados presentan porosidades aparentes superiores al 30% (NEVILLE, A. M. 1981).

En los casos de necesidad de conversión de los resultados de resistencia obtenida del ensayo a compresión de los testigos, en resistencia real del hormigón “in situ” y posteriormente, en resistencia del hormigón a pie de obra (como fue suministrado en fresco, en su día), la principal dificultad a la hora de interpretar los resultados, proviene de que los testigos no representan la resistencia del hormigón “in situ”, sino que se encuentran afectados por unas variables conocidas de la propia probeta testigo (esbeltez, dirección de la extracción y posible presencia de armaduras). Y la resistencia del hormigón “in situ”, endurecido, es el resultado final de la calidad del hormigón fresco suministrado por el proveedor, en su momento, más la influencia de las operaciones de ejecución y puesta en obra (vertido, vibrado y curado), por lo que los resultados directos de la resistencia del hormigón a través de los testigos, no pueden usarse para limitar las responsabilidades de las partes. Por tanto, para la determinación de la resistencia del hormigón “in situ”, es necesario introducir determinados coeficientes de corrección, para poder comparar testigos de diferente esbeltez o compensar la disminución de resistencia producida por la presencia de armaduras en el testigo o por la dirección de la carga respecto el hormigonado. Se pueden consultar varios autores al respecto y atender a algunas recomendaciones bibliográficas (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI, CONCRETE

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

SOCIETY TECHNICAL REPORT, 1982), pero en general, todos coinciden en la necesidad de introducir unos factores de corrección básicos, de forma que:

$$f_{c,u} = K_1 K_2 K_3 f_{c,t}$$

en donde:

$f_{c,u}$ : resistencia del hormigón “in-situ”.

$f_{c,t}$ : resistencia del testigo.

$K_1$ : factor de corrección por la esbeltez del testigo. Estos coeficientes se recogen en la tabla.

$K_2$ : factor de corrección por la dirección de la carga respecto a la de hormigonado, visto previamente.

$K_3$ : factor de corrección por la presencia de armaduras.

Tabla nº 3.1: Factores de corrección (Probetas cilíndricas normalizadas).

<b>Relación Altura/diámetro</b>	2	1.75	1.5	1.25	1.1	1.0
<b>Factor de Corrección</b>	1	0.98	0.96	0.94	0.90	0.80

(Tabla de Coeficientes de Corrección por Esbeltez, para probetas cilíndricas).

Por otra parte, la presencia de barras de refuerzo, aunque no deseable, a veces inevitable, puede dar lugar a una disminución de más del 5% de la resistencia.

En caso de desviaciones superiores al 13% sobre valores contrastados obtenidos en probetas testigo de la misma zona o de otros elementos estructurales sin presencia de armaduras, se rechaza directamente el valor obtenido (MICHAELS T. E. and JOHNSON, S., 2005).

Para poder usar los resultados de los testigos en la evaluación de la calidad del hormigón suministrado en su día por el fabricante, es necesario extrapolarlos para obtener una resistencia final, que sería el resultado de la fabricación de probetas en condiciones normalizadas de máxima compactación y curado ideal, ya que esta resistencia es la que se emplea para juzgar la calidad de un hormigón “en fresco” suministrado a una obra. (REVUELTA y GUTIERREZ, 2009). Por tanto, la resistencia del hormigón “in situ” debe corregirse por tres factores adicionales:

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

$$f_{c,e} = K_4 K_5 K_6 f_{c,u}$$

donde

$f_{c,e}$ : resistencia equivalente del hormigón a pie de obra, asimilable a los resultados dados por probetas cilíndricas normalizadas de 15 x 30 cm.

$f_{c,u}$ : resistencia del hormigón “in situ”, obtenida a partir de los resultados de probetas testigo.

$K_4$ : factor de corrección por condiciones de compactación.

$K_5$ : factor de corrección por condiciones de curado.

$K_6$ : factor de corrección por edad. La resistencia del hormigón a pie de obra se determina a la edad de 28 días, por lo que pueden usarse los coeficientes de conversión propuestos en la INSTRUCCIÓN EHE, que se recogen en la tabla siguiente.

Tabla nº 3.2: Factores de conversión

Edad del hormigón, en días	3	7	28	90	360
Hormigones de endurecimiento normal	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
Hormigones de endurecimiento rápido	0,55	0,75	1,00	1,15	1,20

(Tabla de Coeficientes de Conversión por edad del hormigón en el momento de la rotura).

Estimar los coeficientes  $K_4$  y  $K_5$  es una labor complicada. La compactación en obra muchas veces no consigue eliminar completamente todo el aire atrapado dentro del hormigón, por lo que se produce el exceso de poros que se ha calculado previamente. Estos poros producen una caída de resistencia que en general puede estimarse en un 5% por cada 1% de aire en exceso contenido en el hormigón. Alguna bibliografía de referencia (REVUELTA, D. y GUTIERREZ, J. P. 2009) propone los coeficientes de corrección de la siguiente tabla:

Tabla nº 3.3: Factor de corrección por compactación

Porcentaje de aire en exceso (%)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Factor de corrección por compactación $K_4$	1,08	1,13	1,18	1,23	1,28	1,33	1,39	1,45	1,51

(Tabla de factores de corrección por compactación en función del exceso de poros).

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

La calidad y continuidad del proceso de curado afecta sin duda alguna, a la resistencia del hormigón, generalmente de forma negativa. En ese sentido, se recuerda que la determinación de la resistencia del hormigón efectuada con probetas cilíndricas normalizadas de 15 x 30 cm., exige el curado de las mismas en condiciones de temperatura y humedad ideales ( $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y un 95% de humedad relativa del aire, en el interior de la cámara de curado), condiciones que no se alcanzan en la obra, especialmente en lo que se refiere a la humedad. En esa misma línea se encuentran las BRITISH STANDARD – BS, las DEUTSCHEN BETON NORMEN – DIN/EN y la Norma Francesa, REGLES BAEI 99: TECHNIQUES ET CONSTRUCTIONS EN BETON ARMÉ.

La ya citada anteriormente Instrucción de Hormigón Estructural INSTRUCCIÓN EHE 08 española, contempla la posibilidad de realizar ensayos de información complementaria, como ya se ha indicado, en el caso de que los ensayos convencionales de control de recepción del hormigón, den como resultado un incumplimiento de los criterios de aceptación. Sin embargo, aunque una de las opciones dadas es el análisis mediante rotura en ensayo a compresión simple de probetas testigo extraídas de las zonas afectadas, (Ver fotografía nº 27) en España no existe ninguna norma o guía de procedimiento aceptada, por lo que los procesos de muestreo, preparación e interpretación de los resultados son delicados y dan origen a numerosas controversias. Otros países de nuestro entorno, llevan años empleando procedimientos aceptados e incluso se ha publicado alguna norma que describe el procedimiento a seguir para la evaluación de estructuras de hormigón mediante probetas testigo (ASTM – TESTING DRILLED, 1982).



**Fotografía nº 27**  
**Probetas Testigo.**

Detalle de una serie de probetas testigo de hormigón, una vez ensayadas. Véase la forma de su rotura, que se repite miméticamente en todos los procesos de ensayo de probetas testigo de hormigón.



### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

En ese sentido, un posible procedimiento consiste en separar claramente la resistencia “in situ” del hormigón, es decir, tal como se encuentra en el elemento del que se extrae el testigo, que se ha sometido a distintas operaciones en el proceso de ejecución, que pueden haber afectado a su resistencia, de lo que es la resistencia a pie de obra, medida sobre probetas cilíndricas de hormigón, elaboradas y curadas en su momento, según un procedimiento normalizado. La aceptación por todas las partes implicadas en un caso de evaluación de la calidad del hormigón, de un procedimiento previo, como el propuesto en la bibliografía consultada (REVUELTA y GUTIERREZ, 2009) y expuesto en este trabajo, que incluye una serie de factores de conversión entre la resistencia directa obtenida del ensayo de los testigos, la resistencia del elemento y la resistencia del hormigón suministrado, facilitaría mucho los acuerdos posteriores, ante posibles incumplimientos de los requerimientos de resistencia del hormigón entregado a obra, al establecer unos criterios claros y con base científica de interpretación de los resultados, tratándose de una fase del conocimiento que excede del objeto principal de esta Tesis Doctoral.

#### **Ensayos de laboratorio.**

Una vez finalizados los trabajos de auscultación en la obra objeto de chequeo estructural, se procede a la realización de los correspondientes ensayos de laboratorio, siempre en un Laboratorio Acreditado, a fin de que sus resultados dispongan de “valor legal” para su uso en Informes Periciales o cualquier otra documentación, con carácter oficial. Entre los ensayos más habituales que complementan las actividades de un chequeo estructural, destacamos:

- Compresión Simple.
- Profundidad de Carbonatación.
- Contenido de Cloruros.
- Contenido de Sulfatos.
- Porosidad y Densidad.

A continuación describimos brevemente el proceso y conoceremos las aplicaciones concretas, para cada uno de ellos, así como la información que de su aplicación podemos obtener:

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

#### **Compresión Simple.**

Se trata de un ensayo mecánico para obtener la resistencia real de hormigón, según se ha explicado con anterioridad y es uno de los resultados objeto de correlación en este trabajo.

#### **Profundidad de Carbonatación en testigo ensayado.**

Se sigue el método del uso de la disolución de Fenolftaleína, aplicando la técnica previamente a ser ensayado el testigo, para conocer la profundidad de carbonatación y así comprobar si puede haber llegado a provocar la desprotección de las armaduras, de la pieza objeto de ensayo. Su resultado, de manera cuantitativa, no está ligado a los valores de correlación que estamos estudiando.

#### **Contenido de cloruros y sulfatos.**

Son análisis químicos que se realizan sobre las muestras de hormigón extraídas, para detectar posibles sustancias nocivas para el hormigón en contacto con las armaduras, que pueden estar contenidas en algunos de los materiales componentes del hormigón, y provocar el avance de los daños en las armaduras. Su resultado, de manera cuantitativa, no está ligado a los valores de correlación que estamos estudiando.

#### **Porosidad y Densidad.**

Son dos propiedades del hormigón íntimamente ligadas entre sí y relacionadas con la cantidad de agua de amasado, el contenido de huecos y otros factores que sin duda influyen en el comportamiento estructural de un elemento objeto de peritación. Su resultado, de manera cuantitativa, no está ligado a los valores de correlación que estamos estudiando.

De todos ellos, se utilizaron para el proceso de investigación llevado a cabo en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, exclusivamente los valores obtenidos del ensayo a **Compresión Simple** de las Probetas Testigo de Hormigón, cuyos resultados vamos a correlacionar con los valores de velocidad obtenidos en el **Ensayo de Ultrasonidos**, realizado sobre las mismas piezas de

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

hormigón armado.

#### **3.3.- Los casos más frecuentes.**

Analizando los distintos casos, en los que se da con más frecuencia la necesidad de un chequeo estructural, avanzamos aquí que todo este trabajo lo está realizando el autor, con tres objetivos concretos, uno llegar a conocer con mayor profundidad, las distintas herramientas de que el técnico dispone, para llevar a cabo un “chequeo de estructura”, otro, conseguir la “máxima fiabilidad del resultado”, lo que facilitará la interpretación de los mismos, dando una mayor credibilidad al análisis – peritación estructural del edificio afectado y un tercero, disponer de una documentación que nos permita su divulgación y actuaciones formativas, como ya se ha dicho, en nuestras propias aulas universitarias.

Son muchos y muy diversos, los factores que pueden hacer necesario un chequeo estructural en un edificio cualquiera, como paso previo a la emisión de un Informe Pericial, con un diagnóstico del estado de su estructura y nivel de seguridad estructural, el cual debe ser fiable y acertado, para poder establecer el tipo de actuación más idónea en cada caso (IECA LEVANTE, 2000).

Los casos más habituales donde se hace necesario disponer de estas herramientas de chequeo, son aquellos en los que se quiere llegar a conocer el comportamiento estructural de elementos de:

- Cimentación.
- Muros de contención o muros de carga.
- Pilares y vigas – jácenas.
- Forjados – losas.

O para cualquier otro elemento estructural, sobre el que se requiera su conocimiento, como paso previo para un posterior diagnóstico de la pieza, del elemento o del conjunto estructural completo.

Estas actuaciones de chequeo estructural se pondrán en marcha para cualquiera de los elementos estructurales antes citados, en las que se den circunstancias como las siguientes:

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- Procesos de corrosión de armaduras.
- Deficiente calidad del hormigón.
- Necesidad de cambio de uso estructural.
- Existencia de patología del hormigón o del acero de armar.
- Necesidad de evaluaciones estructurales.
- Peritaciones judiciales.

O en cualquier otra afección estructural, con la que el profesional – técnico se pueda encontrar en su labor de control o de inspección de estructuras existentes de hormigón armado o en actuaciones de Peritos de parte o en Peritaciones Judiciales.

Se destaca en este sentido una situación que se da con gran frecuencia en las estructuras, por influencia de corrosión de armaduras (Ver fotografías nº 28 y 29), por su afección en el comportamiento del hormigón, por la presencia de humedades, aparición de grietas por esa consecuencia, que especialmente se encuentran en ambientes, más extremos o con altos porcentajes de humedad latente. Esta variable se ha considerado en esta Tesis Doctoral, al analizar edificios situados a más y a menos de 500 metros de la costa.



**Fotografía n° 28**  
**Corrosión por afección ambiental.**

Detalle del proceso de medición de la importante grieta producida en el hormigón, por efecto de la corrosión de la armadura principal del pilar afectado, objeto de investigación, sobre el que se realizarán los pertinentes ensayos de Ultrasonidos y posterior extracción de una Probeta Testigo, para conocer la resistencia real del hormigón de ese elemento y posteriores correlaciones.

Los productos resultantes de la corrosión ocupan un volumen mucho mayor que el metal a partir del cual se forman. Si el metal corroído va recubierto con otro material (armaduras en una pieza de hormigón armado), se produce un aumento de volumen que suele provocar la aparición de grietas en el material de recubrimiento (BERMUDEZ, M. A. y ALAEJOS, P. 2009).

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA****Fotografía n° 29****Proceso avanzado de corrosión de armaduras.**

Detalle del proceso de medición de la corrosión de la armadura principal de uno de los pilares objeto de investigación. Se compara el diámetro nominal de la barra de acero, con el real y tras su limpieza y decapado, se mide el diámetro final de la barra afectada.

La corrosión de la armadura no sólo reduce la sección del acero y la adherencia con el hormigón, sino que al quedar más frágil afecta también a la ductilidad de la estructura de hormigón armado y finalmente a su capacidad portante. Todo ello se incrementa por la influencia de la profundidad de carbonatación (Ver fotografías n° 8, 9, 19, 20 y 21).

Resumiendo, una armadura que se corroe presenta los siguientes inconvenientes:

- Se reduce la adherencia entre el acero y el hormigón.
- Se reduce o se pierde el corrugado y por lo tanto su adherencia.
- Se reduce la sección del acero, quedando con menor capacidad resistente.
- Al corroerse las barras se pueden fragilizar y presentar una rotura frágil.
- Se reduce su ductilidad.

En relación al fenómeno de ascensión de la humedad por capilaridad, en pilares, situados en terrenos agresivos o en ambientes marinos, donde se produce una continua absorción de agua por capilaridad y a continuación su evaporación, se inician procesos de corrosión de su armadura que ocasionan la destrucción química del hormigón, denominada “desagregación”, dando origen a la aparición de fisuras y grietas, en la trayectoria de la armadura de la pieza.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

Cuando un elemento estructural padece humedad de ascenso por capilaridad, debe tenerse en cuenta la cantidad de agua que penetra y sale de él, produciéndole un flujo continuo que lo deteriora. Es frecuente el caso de un pilar situado en planta baja, en el que se ha corroído su armadura por capilaridad, al absorber el agua del terreno y por existir una elevada humedad en su entorno y haber penetrado agua en su interior. Cuando un elemento de hormigón queda sometido a los ciclos de humectación y secado, alternativamente, le afecta considerablemente a la armadura y aún más, cuando se ha iniciado la corrosión, surgiendo así las primeras fisuras sobre las barras (INSTITUTO ESPAÑOL CORROSIÓN Y PROTECCIÓN, 2003).

Nos hemos centrado en el caso frecuente de la corrosión de armaduras y no hemos desarrollado el resto de situaciones apuntadas, también como casos frecuentes, ya que la metodología de chequeo y la correlación de resultados, objeto principal de esta Tesis Doctoral, es la misma para todos ellos, con la investigada correlación entre las resistencias del hormigón (R) y la velocidad de ultrasonidos (V).

Avanzando en el conocimiento y repitiendo algunas consideraciones de partida, se quiere hacer constar de nuevo, insistiendo, que en el resultado final de las dos pruebas – ensayos objeto de correlación, se dan una gran cantidad de circunstancias que afectan a estos resultados siendo de todo grado inviable, valorar su influencia directa en el resultado final de los ensayos objeto de investigación que se recuerda:

- Dosificación del hormigón.
- Compacidad del hormigón.
- Relación agua/cemento (a/c).
- Índice de porosidad.
- Tipo y tamaño de árido: su granulometría.
- Tipo y dimensión de la pieza.
- Humedad de la pieza.
- Rugosidad superficial de la zona a ensayar.
- Nivel tensional del elemento.
- Presencia de armaduras.
- Edad del hormigón.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- Apreciación del técnico que efectúa el ensayo.

Como se ha dicho, estas circunstancias son totalmente variables, incontrolables y que de una u otra forma afectan al resultado de los ensayos, que por motivos obvios, no se han recogido en este proceso de investigación.

En cualquier caso, dada la gran cantidad de datos que se han manejado en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, se entiende que la influencia de todas estas circunstancias queda diluida, repartida, compensada y distribuida, de forma generalizada entre todos los ensayos llevados a cabo, por lo que su influencia en las conclusiones finales, se puede considerar como nula.

**3.4.- Metodología estadística.**

En este apartado se dan las claves del proceso metodológico seguido para la obtención de los resultados que permitirán la emisión de las conclusiones finales de la presente Tesis Doctoral, a través de tres siguientes subapartados:

3.4.1.- Conceptos básicos y definiciones.

3.4.2.- Metodología de análisis.

3.4.3.- Análisis estadístico.

A continuación, se desarrolla de forma más concreta, cada uno de ellos:

**3.4.1.- Conceptos básicos y definiciones.**

Aunque se entiende que no es necesario, dado el carácter investigador de esta tesis, el doctorando que suscribe, considera conveniente avanzar algunas ideas básicas de estadística, que se han tenido en cuenta en el proceso de análisis de los datos, que puedan servir de recordatorio al lector y futuro usuario de este documento. Para empezar, conviene recordar algunas definiciones básicas:

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

---

**Población:** Todos los individuos sobre los que se desea realizar una investigación o estudio. Cuando la información necesaria para el estudio ha sido extraída de todos y cada uno de los individuos de la población, se habla de censo de población. Si por el contrario no es posible acceder a todos los sujetos por falta de recursos, se procede a tomar una muestra aleatoria de la población de estudio, que presentan características comunes.

"Una población es un conjunto de todos los elementos que estamos estudiando, acerca de los cuales intentamos sacar conclusiones" (LEVIN & RUBIN, 1996).

"Una población es un conjunto de elementos que presentan una característica común" (CADENAS, 1974).

En este caso se correspondería con todos los pilares de hormigón de los edificios situados en el área geográfica de actuación.

**Muestra:** Conjunto de sujetos necesario para llevar a cabo una investigación, de manera que los resultados obtenidos a partir de ellos, se aproximen a los resultados que se hubieran obtenido al estudiar a toda la población. El error cometido en esa extrapolación de resultados es conocido y prefijado antes de comenzar la investigación. El tamaño de muestra será mayor cuanto más pequeño sea el error que se desee cometer.

"Se llama muestra a una parte de la población a estudiar que sirve para representarla" (MURRIA R. SPIEGEL, 1991).

"Una muestra es una colección de algunos elementos de la población, pero no de todos" (LEVIN & RUBIN, 1996).

"Una muestra debe ser definida en base de la población determinada y las conclusiones que se obtengan de dicha muestra, solo podrán referirse a la población en referencia" (CADENAS, 1974).

En este caso, corresponde a los pilares estudiados: 185 unidades inicialmente y 180 unidades, tras la depuración de datos y eliminación de los valores "outlier". Llamaremos "caso", a cada uno de los pilares estudiados.



### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

**Tamaño de la muestra:** Es el número de sujetos que componen la muestra extraída de una población, necesarios para que los datos obtenidos sean representativos de la población. Se calculan con fórmulas ya experimentadas, como se verá más adelante.

**Media:** Es un promedio que representa el centro de gravedad de la masa de datos.

**Desviación típica:** Mide la dispersión de una característica de los individuos alrededor de la media del grupo. Los sujetos serán más parecidos u homogéneos entre sí cuanto más próxima a cero esté la desviación típica. Su unidad de medida coincide con la unidad de medida de la variable original. Es la raíz cuadrada de la varianza.

**Mediana:** Es el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después que él, una vez ordenados de menor a mayor. De acuerdo con esta definición, el conjunto de datos menores o iguales que la mediana representarán el 50% de los datos y los que sean mayores que la mediana, representarán el otro 50% del total de datos de la muestra. La mediana coincide con el percentil 50 y con el segundo cuartil.

**Cuartiles:** En estadística descriptiva, las medidas de posición no central permiten conocer otros puntos característicos de la distribución, que no son los valores centrales. Entre las medidas de posición no central más importantes están los cuartiles, que son aquellos valores de la variable, que ordenados de menor a mayor, dividen a la distribución en partes, de tal manera que cada una de ellas contiene el mismo número de frecuencias, que dividen a la distribución en cuatro partes.

**Curtosis:** Es una medida de la forma o apuntamiento de las distribuciones. Las medidas de curtosis (también llamadas de apuntamiento o de concentración central), tratan de estudiar la mayor o menor concentración de frecuencias alrededor de la media y en la zona central de la distribución. También se identifica con la altura del histograma en relación a la altura de la Campana de Gauss de la misma media y desviación típica.

**Bisagra de Tukey:** Corresponde a los valores de límites de la curva normal.

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

---

**Correlación:** Medida de la relación existente entre dos variables. Su valor está comprendido entre  $-1$  y  $1$ . Si es negativo la relación entre las variables es inversa, es decir, a medida que aumentan los valores de una, decrecen los de la otra. Si es positivo, la asociación es directa, es decir, los valores de una variable aumentan con la otra. Un valor de cero indica ausencia de relación.

**Test de Hipótesis:** Técnica estadística utilizada para decidir si una afirmación establecida por el investigador sobre la población de estudio es compatible con los resultados observados en una muestra. Cualquier test de hipótesis se compone de una hipótesis nula, formulada en términos de igualdad o negación, y una hipótesis alternativa.

Dentro del análisis estadístico, un “test” (también denominado “contraste de hipótesis” o “prueba de significación”) es un procedimiento para juzgar si una propiedad que se supone cumple una población estadística, es compatible con lo observado en una muestra de dicha población.

Mediante esta teoría, se aborda el problema estadístico considerando una hipótesis determinada y una “hipótesis alternativa” y se intenta dirimir cuál de las dos es la hipótesis verdadera, tras aplicar el problema estadístico a un cierto número de experimentos.

**Hipótesis nula:** Afirmación establecida por el investigador sobre la población de estudio cuando realiza un test o contraste de hipótesis. Esta hipótesis siempre se asume verdadera, a menos que los datos de la muestra proporcionen evidencia de lo contrario. Se suele formular mediante una negación o una igualdad. La hipótesis alternativa es la aseveración opuesta a la hipótesis nula en un test o contraste de hipótesis.

**Inferencia estadística:** Procedimiento que permite extrapolar o generalizar a la población los resultados obtenidos en el análisis de una muestra. Las técnicas utilizadas para ello incluyen los intervalos de confianza y los tests de hipótesis.

**Intervalo de confianza:** Un par de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido, con una determinada probabilidad de acierto. Formalmente, estos números determinan un intervalo, que se calcula a partir de datos de una muestra y el valor desconocido

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

es un parámetro poblacional. La probabilidad de éxito en la estimación se representa con  $1 - \alpha$  y se denomina *nivel de confianza*. En estas circunstancias,  $\alpha$  es el llamado error aleatorio o *nivel de significación*, que es una medida de las posibilidades de fallar en la estimación mediante tal intervalo. El nivel de confianza y la amplitud del intervalo varían conjuntamente, de forma que un intervalo más amplio tendrá más posibilidades de acierto (mayor nivel de confianza), mientras que para un intervalo más pequeño, que ofrece una estimación más precisa, aumentan sus posibilidades de error.

**Nivel de confianza (1- $\alpha$ ):** Probabilidad de que el intervalo de confianza obtenido a partir de los datos de la muestra contenga al parámetro de la población que se pretende estimar, pudiendo tomar cualquier valor entre 0 y 1, el más usual es 0.95 (95%).

**Probabilidad:** Medida adimensional que cuantifica la ocurrencia de los fenómenos producidos por azar. Sus valores son números comprendidos entre 0 y 1. Cuando la probabilidad es cero, el suceso es raro. Si la probabilidad es uno, ocurrirá casi seguramente. Los valores intermedios miden el gradiente de certidumbre.

**Valor P:** Valor comprendido entre 0 y 1 que mide el grado de acuerdo entre la información que proporciona la muestra y la hipótesis nula del test de hipótesis. Cuanto más próximo a cero esté, menor será el acuerdo entre ambas. Así, la hipótesis nula será rechazada en favor de la alternativa siempre que el Valor P sea muy pequeño, inferior al nivel de significación preestablecido.

**Poder explicativo  $R^2$ :** Se denomina coeficiente de determinación y mide la bondad del ajuste del modelo a los datos, se define como el porcentaje de la varianza de la variable dependiente, que es explicada por el modelo de regresión. Aplicado a esta investigación, si se tienen dos variables: velocidad (V) y resistencia (R), cada una tendrá una variabilidad (varianza) y se quiere predecir lo que le ocurre a la resistencia, a partir de los valores de la velocidad y para ello se estima un modelo lineal, o uno cuadrático. Un valor de 0,693, significa que supone casi un 70 %. Si el ajuste fuese perfecto, todos los datos estarían sobre la línea, entonces  $R^2=1$ , y el modelo explicaría el 100 % de cómo varía la resistencia (R), a partir de los valores de la velocidad (V).

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

---

**Poder estadístico del 80 %:** Cuando se realiza un contraste de hipótesis, la correlación es cero, frente a la correlación es distinta de cero, la decisión de rechazar o aceptar como verdadera la hipótesis planteada, se toma a partir de los datos de una muestra aleatoria. Como los datos son una muestra aleatoria, la decisión puede ser acertada o errónea. La probabilidad de rechazar la hipótesis como falsa, cuando realmente es falsa, se llama potencia del test o poder estadístico del test de hipótesis. En general, lo que se desea es que la potencia sea máxima y así no aceptar hipótesis falsas. Por eso se suele fijar en un mínimo de 0,80.

**Tipo de error:** Error de tipo I. Es el que se comete cuando se acepta como verdadera, una hipótesis que realmente es falsa. Error de tipo II. Es el que se comete cuando se rechaza como falsa, una hipótesis que realmente es verdadera. Los errores se cometen porque la decisión de aceptar o rechazar se toma en base a la información de una muestra y no del conocimiento de toda la población.

**Curva de Gauss:** También se denomina “Función gaussiana” es una función definida y por una expresión matemática y su representación gráfica. La gráfica de la función es simétrica con forma de campana, conocida como “Campana de Gauss”, donde el parámetro  $a$  es la altura de la campana centrada en el punto  $b$ , determinando  $c$  el ancho de la misma.

**Valor “Outlier”:** Es un término estadístico que representa los valores atípicos, los más distantes, una observación que es numéricamente distante del resto de los datos, una observación periférica o errática, el que parece apartarse notablemente de los demás miembros de la muestra en la que se produce. Los valores extremos pueden ocurrir por casualidad en cualquier distribución, pero a menudo son indicativos de error de medición o que la población tiene una distribución de cola pesada. En el primer caso, es necesario desprenderse de ellos eliminando los valores atípicos, mientras que en este último caso, indican que la distribución tiene una alta curtosis y que uno debe ser muy cauteloso en el uso de la herramienta o intuiciones que asumen una distribución normal.

**Cuadro de caja:** También llamado gráfico de caja y se trata de una técnica para la localización y tratamiento de los datos “outlier” situados en los extremos, denominados “bigotes de la caja”, como veremos más adelante. La caja es sin duda la representación gráfica para una variable

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

continua que presta más información y cada vez más utilizada en los artículos científicos. La caja consiste en un eje vertical donde se representa la escala de la variable a representar; entonces se dibuja un rectángulo central cuya base inferior está a la altura del primer cuartil y la base superior a nivel del tercer cuartil; entre ellos se dibuja un segmento de mayor grosor que representa la mediana.

**Técnica ANOVA (Analysis of Variance):** El análisis de la varianza (ANOVA, según terminología inglesa), es un procedimiento estadístico que consiste en un contraste de igualdad de medias de una variable dependiente en un grupo definido por los niveles de otra variable denominada factor.

**Coefficiente de correlación de Pearson:** Es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. Se trata del coeficiente de correlación entre dos variables aleatorias  $X$  e  $Y$ . El valor del índice de correlación varía en el intervalo  $[-1, +1]$ :

- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.
- Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.
- Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.
- $-1$  (Relación perfecta negativa).
- $0$  (No hay correlación).
- $+1$  (Relación perfecta positiva).

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

---

**Significancia estadística:** Un resultado se denomina “estadísticamente significativo” cuando no es probable que haya sido debido al azar. Una "diferencia estadísticamente significativa" solamente significa que hay evidencias estadísticas de que hay una diferencia. No significa que la diferencia sea grande, importante o significativa en el sentido estricto de la palabra. El nivel de significación de un test es un concepto estadístico asociado a la verificación de una hipótesis. Se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera. La decisión se toma a menudo utilizando el valor P (o p-valor). Si el valor P es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor P, más significativo será el resultado.

**Regresión:** Técnicas estadísticas que permiten determinar la ecuación matemática que relaciona un efecto (variable dependiente o respuesta) con una o varias causas (variables independientes o predictoras).

**Regresión lineal:** La regresión lineal o ajuste lineal es un método matemático que modeliza la relación entre una variable dependiente Y, las variables independientes  $X_i$  y un término aleatorio  $\epsilon$ . El término lineal se emplea para distinguirlo del resto de técnicas de regresión, que emplean modelos basados en cualquier clase de función matemática. Los modelos lineales son una explicación simplificada de la realidad, mucho más ágil y con un soporte teórico por parte de la matemática y la estadística mucho más extenso.

Entre las aplicaciones de la regresión lineal, se encuentran las líneas de tendencia o también tendencia. Una línea de tendencia representa una tendencia en una serie de datos obtenidos a través de un largo período. Se puede dibujar una línea de tendencia a simple vista fácilmente a partir de un grupo de puntos, pero su posición y pendiente se calcula de manera más precisa utilizando técnicas estadísticas como las regresiones lineales. Las líneas de tendencia suelen ser generalmente líneas rectas.

**Regresión cuadrática:** La regresión cuadrática es el proceso por el cual encontramos los parámetros de una parábola que mejor se ajusten a una serie de datos que poseemos.

### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

Con este repaso de ideas básicas de estadística se hace más fácil el proceso de comprensión e interpretación del análisis estadístico realizado como soporte de esta Tesis Doctoral, que se desarrolla a continuación.

#### **3.4.2.- Metodología de análisis.**

En este apartado se dan las claves del proceso metodológico seguido para la emisión de las conclusiones finales de la presente Tesis Doctoral:

1.- Disponibilidad de un elevado número de “valores de partida”, poco frecuentes en una investigación de este tipo (Casi 200 probetas - testigo y más de 3000 valores de ultrasonidos). Los valores de partida han sido seleccionados y depurados, mediante una limpieza de los valores “Outlier”, utilizando el método analítico y la técnica de Gráfico de Caja.

2.- Se han realizado unos primeros análisis estadísticos de los datos globales, con todos los valores, estudiando:

- Datos descriptivos (Valores máximos, mínimos, medias, desviación típica, etc.)
- Un primer análisis exploratorio (Mediana, valores “outlier” – valores extremos – atípicos, etc.)
- Análisis de las Curvas de Gauss (Curva normal).
- Correlaciones de distintos modelos.
- Test de hipótesis.
- Prueba de Kolmogorov (Análisis estadístico con datos globales).

3.- Análisis independiente de distintas variables de relación entre velocidades (V) y resistencias (R) reales, para localización y edad de la estructura:

- Con datos globales.
- Por localización (A más o menos de 500 metros de la costa).
- Por edad (más o menos de 20 años).
- Análisis interrelacional: por tipología de edificios.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

4.- Análisis de los resultados finales, estudiando los siguientes parámetros:

- Valor verdadero.
- Intervalo de confianza (Región de Confianza), donde se da el 95 % de probabilidades de encontrarse el “valor verdadero”.
- Análisis por el método “ANOVA”.

En base a todo ello se proponen los distintos modelos de regresión, para las variables de resistencia (R) y velocidad (V), para la edad 1 y 2 y la situación 1 y 2, planteadas desde el inicio de esta investigación.

**3.4.3.- Análisis estadístico.**

El análisis estadístico llevado a cabo en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, consta de los siguientes procedimientos:

**a) Análisis descriptivo**

Dentro del análisis descriptivo de los datos, se desarrollan con los siguientes apartados:

**a.1 Depuración de los datos.**

En primer lugar, la base de datos inicial se analiza para detectar posibles errores que pudieran tener influencia significativa y no deseable sobre los resultados. A tal efecto se aplican métodos de filtrado de “outliers” tanto analíticos como gráficos, en cada una de las variables esenciales del estudio.

**Análisis de valores atípicos.**

Uno de los problemas habituales en el análisis de datos, es manejar valores atípicos (“outliers”) en un conjunto de datos. Un valor atípico es una observación con un valor que no parece corresponderse con el resto de valores, en el grupo de datos analizados. A los valores atípicos también suelen llamarse valores “aberrantes” o “inconsistentes”.



### **3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

Se hace necesario entonces saber si realmente es un valor atípico y si podemos o no eliminarlo y continuar con el análisis de datos. Para ello se utilizan como se ha dicho, métodos analíticos y el ya referido método del “Gráfico de Caja”, donde se detectan los valores “outliers”. Una vez detectados, antes de su eliminación, debe quedar constancia de que una observación (dato) no debe retirarse a menos que una investigación encuentre una causa probable que justifique esta acción y en todos los casos, se hace necesario indicar en el estudio si el valor atípico tiene influencia en la conclusión final (THOMAS MURPHY and ALEX LAU, 2008).

#### **Gráfico de Caja.**

Los diagramas de Caja-Bigotes (boxplots o box and whiskers) son una presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como la dispersión y simetría.

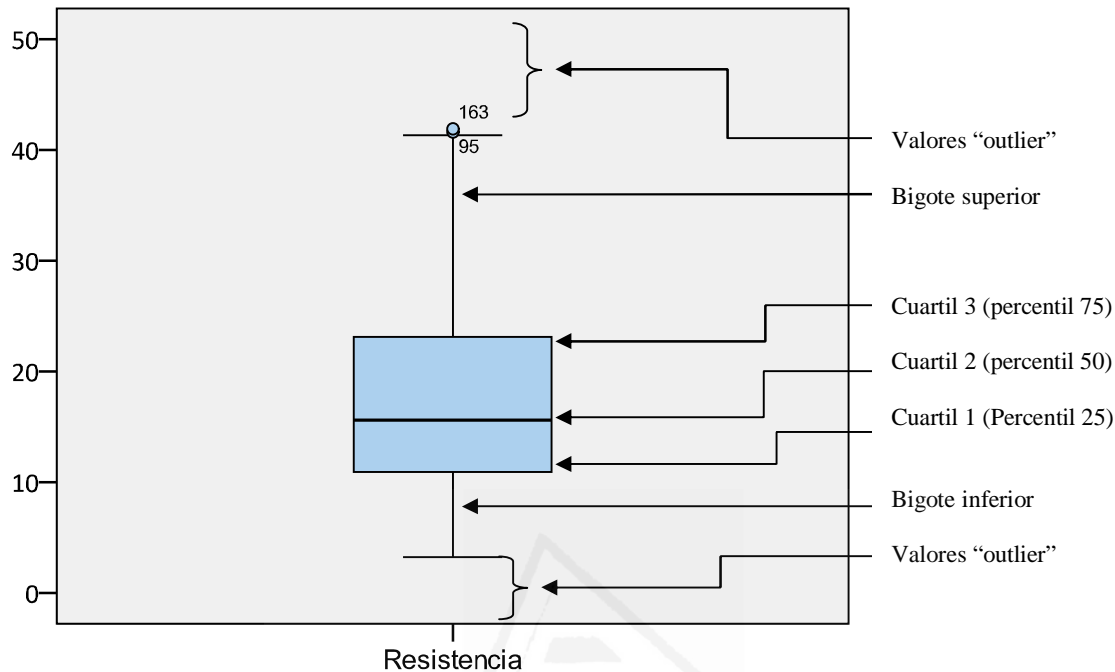
Un diagrama de caja es un gráfico, basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. Para su realización se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, sobre un rectángulo, alineado horizontal o verticalmente.

Una gráfica de este tipo consiste en una caja rectangular, donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico. Este rectángulo está dividido por un segmento vertical que indica donde se posiciona la mediana y por lo tanto su relación con los cuartiles primero y tercero (recordemos que el segundo cuartil coincide con la mediana). Esta caja se ubica a escala sobre un segmento que tiene como extremos los valores mínimo y máximo de la variable. Las líneas que sobresalen de la caja se llaman bigotes, que tienen un límite de prolongación, de modo que cualquier dato o caso que no se encuentre dentro de este rango es marcado e identificado individualmente.

Desde la base inferior se traza una perpendicular al rectángulo que vaya desde el primer cuartil hasta el menor valor de la variable que sea mayor que el primer cuartil menos 1.5 veces el recorrido intercuartílico. A esta línea vertical se la conoce como “bigote inferior”. A los valores

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

que están por debajo del extremo inferior del bigote inferior o por encima del extremo superior, del bigote superior se les considera valores extremos.



**Gráfico 3.1: Esquema de un Diagrama de Caja:** Véase el formato de este sistema gráfico de selección de valores “outlier” y las distintas partes de que se compone. Localizar la posición de los percentiles, los “bigotes de la caja”, los valores detectados, la posición de la mediana, etc.

Una vez descrita su construcción, es obvio que la caja es una herramienta que transmite mucha información acerca de la distribución de una variable. En primer lugar facilita tres medidas de posición como son los tres cuartiles; también da información acerca de la variabilidad pues, además del recorrido intercuartílico, la longitud de los bigotes indica la mayor o menor dispersión de los datos y por último, también da idea de la simetría de la distribución: Esta será tanto más simétrica cuanto más iguales sean las longitudes de los bigotes y cuanto más centrada esté la mediana en el rectángulo central. Por último también permite identificar valores “raros” en el sentido que son “extraños” en relación al resto de los datos. Analíticamente, el proceso se puede realizar comprobando qué casos están fuera del intervalo definido por la media más o menos tres veces el rango intercuartílico.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---

**a.2.- Descripción de la muestra.**

La información contenida en la base de datos se resume mediante estadísticos descriptivos y los gráficos correspondientes. En concreto se presentarán los valores de los siguientes estadísticos: Media aritmética, mediana, desviación típica, cuartiles, asimetría, curtosis, mínimo y máximo.

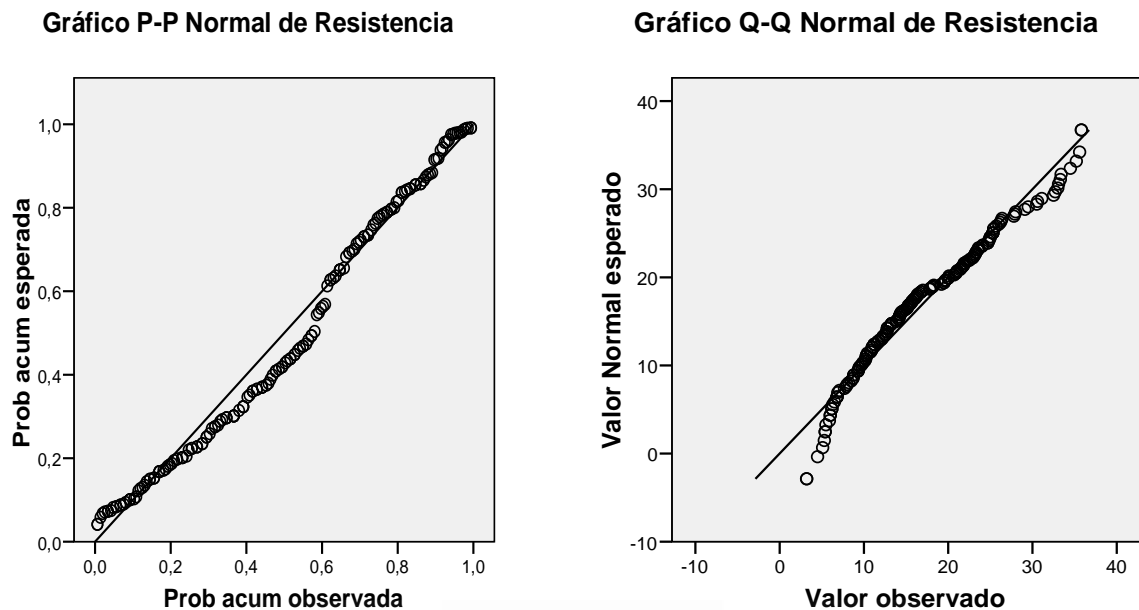
**b) Análisis estadístico inferencial.**

Procediendo ahora al análisis estadístico inferencial, se comprobará la normalidad de los datos disponibles.

**Análisis de normalidad de las variables.**

Como etapa previa a la modelización de la relación existente entre las variables Velocidad (V) y Resistencia (R), se contrasta la hipótesis de distribución Normal para dichas variables. Para ello, se utilizan tanto criterios gráficos como procedimientos estadísticos:

- Los métodos gráficos a utilizar son: Gráficos P-P y Gráficos Q – Q. Son dos tipos de gráficos que relacionan la “probabilidad acumulada observada” con la “probabilidad acumulada esperada” (el gráfico PP) y la relación entre el “valor observado” y el “valor esperado” (el gráfico QQ), para verificar si se ajusta o no, a la curva normal (Gauss). Cuanto más se acerquen los valores obtenidos a la recta dada, mayor es la cercanía a la “normalidad”. Estas gráficas se presentan y discuten más adelante.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

**Gráfico 3.2:** Esquemas de modelos de gráficos PP y QQ para comparación de datos, con la normalidad (Curva de Gauss).

- El método estadístico aplicado es el Test de Kolmogorov- Smirnov. Este test pone de manifiesto, de forma matemática, el acercamiento de nuestros valores a la curva de normalidad (Gauss), analizando los distintos parámetros de media, mediana, desviación típica, asimetría, etc. El resultado numérico del test debe ser mayor de 0,05 en cuyo caso se puede afirmar que nos acercamos a la “normalidad”.

Por otra parte, en cuanto a la exposición de la metodología utilizada, el análisis estadístico se realiza con el apoyo del **Programa SPSS – Versión 20**, para el tratamiento de datos y el **Programa SYSTAT 13 – Versión 2010**, para el análisis de bandas y la gestión de gráficos.

### Correlación entre variables.

Se calcula la correlación lineal entre las dos variables (Velocidad y Resistencia) y se contrasta la significación del coeficiente de correlación de Pearson.

$$r = \frac{\text{Covarianza}(x, y)}{\text{Desviación.Típica}(x) \cdot \text{Desviación.Típica}(y)} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

Toma valores entre  $-1 \leq r \leq 1$

### 3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA

#### c) Estimación de modelos de Regresión

Para dar respuesta al objetivo general de esta investigación, se estiman modelos que representen la relación funcional entre la variable predictiva (velocidad) y la variable dependiente o resultado (resistencia). Se plantean dos tipos de funciones: lineales y cuadráticas. Se analizan, en cada caso, la representatividad de los modelos a través de la estimación del coeficiente de determinación,  $R^2$ .

El objetivo de este modelo, que también se denomina *modelo de regresión lineal univariante*, es determinar cómo cambia, por término medio, la variable respuesta, cuando cambia la predictora.

En general, dada una respuesta  $Y$  y una predictora  $X$ , el modelo de regresión lineal simple se formula así:

$$E(Y / X) = \beta_0 + \beta_1 X$$

o bien

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i$$

donde  $y_i$  y  $x_i$  son los valores de las dos variables para el caso  $i$ . La parte del modelo dada por  $\beta_0 + \beta_1 X$  se conoce como el componente sistemático y  $e$  como el componente de error. El modelo de regresión lineal simple depende de dos parámetros de los que nunca se va a conocer su valor exacto, por ser parámetros poblacionales, pero sí se pueden estimar mediante el método de los mínimos cuadrados.

Como complemento a las estimaciones de los parámetros del modelo, es fundamental calcular el llamado *coeficiente de determinación*, que se suele representar mediante el símbolo  $R^2$ ; dicho coeficiente no es más que el cociente entre la suma de cuadrados debida a la regresión y la suma de cuadrados total, que aparecen en la tabla de ANOVA, de la que ya se ha hecho referencia. Puesto que es el cociente entre la variabilidad que explica la variable independiente en relación a la variabilidad total, se puede interpretar como la parte de la variabilidad de la variable respuesta que es explicada por la predictora – variable independiente.

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

Como es el cociente entre dos cantidades no negativas y el numerador siempre es una parte del denominador, el coeficiente de determinación siempre es mayor o igual a cero y menor o igual que uno, o sea,  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Los valores muy próximos a uno, indican que es una relación lineal casi perfecta entre las dos variables y valores próximos de cero, son evidencia de una casi total dependencia lineal, lo que no implica falta de otro tipo de dependencia más compleja. Así, se puede decir que el coeficiente de determinación es una medida de la *bondad del ajuste* en regresión lineal. La cuestión de qué valores de este coeficiente pueden ser considerados como “buenos” es de difícil respuesta, pues depende mucho del área de aplicación.

Las expresiones de los modelos a estimar que se han manejado en este trabajo de investigación son:

**Para el Modelo Lineal:**

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad} + \text{error aleatorio}$$

**Para el Modelo Cuadrático:**

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2 + \text{error aleatorio}$$

Las anteriores estimaciones se realizarán en:

- Población total (Con todos los valores – datos de que disponemos de V y R).
- Subpoblaciones definidas por el factor Situación: Edificios localizados a menos o más de 500 m de la costa. (L1 y L2).
- Subpoblaciones definidas por el factor Edad: Estructura de edificación con menos o más de 20 años de edad. (E1 y E2).
- Subpoblaciones definidas por tipología de edificios (tipo A, B, C y D).

**Estimación de predicciones de Resistencia (R).**

El modelo de regresión estimado permite realizar predicciones para la variable resultado “resistencia” (R) a partir de un valor observado de la variable independiente “velocidad” (V). Estas estimaciones se realizarán a dos niveles:

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

- Estimación de los valores medios de resistencia (R) para un valor dado de la velocidad (V).
- Estimación del valor concreto de resistencia (R) para un valor dado de la velocidad (V).

En ambos casos, las estimaciones se realizan puntualmente o mediante intervalos de confianza.

**Comparación de los modelos de regresión.**

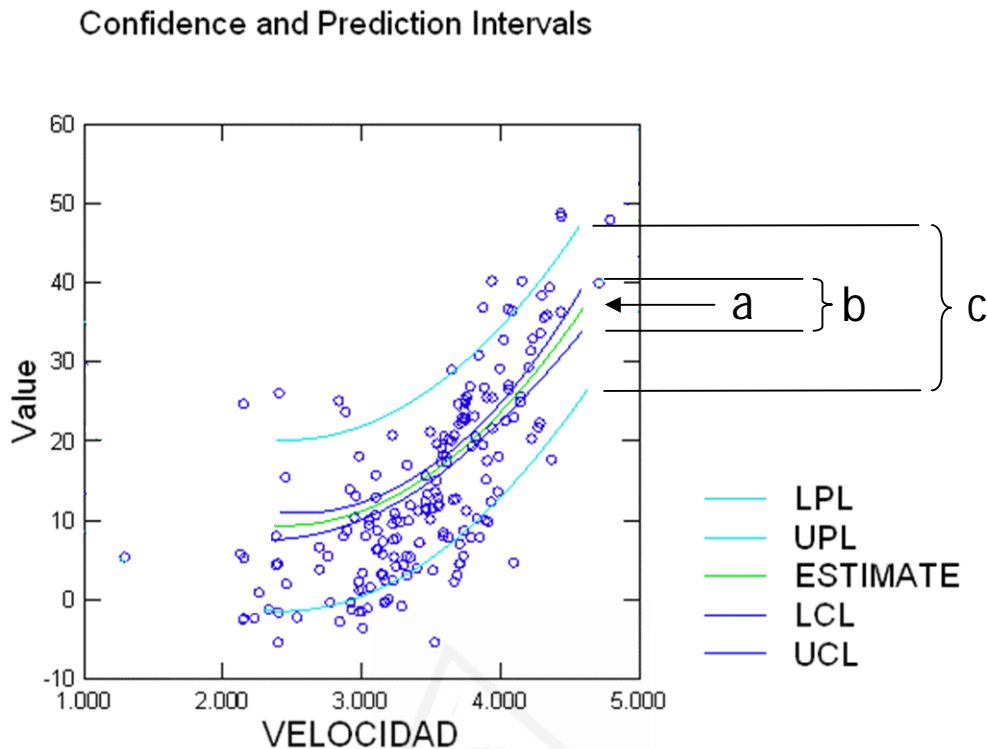
Los modelos estimados en las poblaciones definidas anteriormente (dos por edad, dos por situación, la población global y los distintos tipos de edificios) se comparan mediante las correspondientes potencias explicativas de la variabilidad real de los datos observados. Como consecuencia, se propondrá, para cada población, el modelo que se considere como el mejor de los estimados.

**d) Análisis de la Varianza.**

Este procedimiento estadístico se aplicará para contrastar la existencia de diferencias significativas (no debidas al azar) entre las poblaciones definidas por los niveles de los factores considerados: Edad y Situación del inmueble. Se pretende concluir si, efectivamente, es procedente estimar modelos diferentes en las poblaciones definidas o por el contrario, el factor considerado no ejerce influencia sobre la velocidad y/o sobre la resistencia.

**e) Bandas de confianza.**

Una vez estimado el modelo y su curva/recta de regresión, no se tiene la seguridad total de obtener el valor real de la resistencia del pilar objeto de ensayo, sino que se obtendrá aproximadamente, según la función que dará el valor medio o esperado de todos los valores de la resistencia (R), para ese valor dado de velocidad (V). Por ello y para disponer de una estimación con un mayor nivel de confianza, se diseñan unas bandas que definen los intervalos que contienen el valor verdadero de resistencia, con un 95% de confianza, que queden representadas en el siguiente gráfico:

**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

**Gráfico 3.3:** Esquema de “Bandas de Confianza”.

En este gráfico se aprecia:

**a: Línea – curva central (ESTIMATE):** Estimación puntual de la **resistencia media** (R) para un valor dado de velocidad (V), que confirma la Curva de Regresión Cuadrática.

**b: Banda estrecha (Entre líneas LCL y UCL):** Intervalo de Confianza para cada valor de la velocidad que nos da el intervalo que contiene el valor verdadero de los **valores medios** de resistencia, con un 95% de confianza.

**c: Banda ancha (Entre LPL y UPL):** Contiene los valores reales (no medios) de resistencia, para cada valor de velocidad. Entre estos valores se encuentra, el **valor real** de la resistencia de la pieza analizada – chequeada con un 95% de confianza.



**3. METODOLOGÍA: SECUENCIA METODOLÓGICA**

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# 4



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## **4.- PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

**4.1.- Toma de datos y ensayos realizados**

**4.2.- Determinación del tamaño muestral**

**4.3.- Recopilación de datos**

“Explicar un proceso significa poder derivar de forma provisional pero deductiva, a partir de leyes y condiciones factuales determinadas (llamadas causas), una proposición que describe tal proceso, dentro de un marco de experiencia determinado.

Kart Poper, 1990

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

#### **4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

---



#### **4.- PROCESO DE INVESTIGACION.**

Este trabajo se ha centrado en el estudio y análisis de distintos casos reales, siendo el inicio del proceso de investigación, la realización de distintas intervenciones de chequeo estructural que se han ido ampliando con la aportación de una gran cantidad de datos de casos reales para poder realizar el análisis estadístico y la posterior correlación e interpretación de resultados.

##### **4.1. Toma de datos y ensayos realizados.**

La toma de datos se inició con un cuidadoso proceso de planificación previa, definiendo que resultaban necesarios y los procedimientos más adecuados para su obtención. Para ello se ha contado con los datos facilitados por una serie de Laboratorios Acreditados, localizados en la zona geográfica que se marcó inicialmente, que cubre el Arco Mediterráneo, desde Barcelona hasta Almería.

#### **4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

---

En la citada toma de datos identificábamos los siguientes indicadores:

- Laboratorio Acreditado, responsable de la auscultación, análisis ultrasónico, extracción de las probetas testigo y los posteriores ensayos a Compresión Simple.
- Identificaron del tipo y numeración de la obra.
- Localización geográfica de la obra (Situada a mas o menos de 500 m de la costa)
- Edad del inmueble (Identificando los mayores y menores de 20 años)

Los ensayos realizados para el desarrollo de esta Tesis Doctoral, consistieron en la aplicación de los dos métodos ya citados y objeto de nuestra correlación:

- Velocidad de Ultrasonidos (m/seg): V
- Resistencia a Compresión Simple (Mpa): R

Estos ensayos se realizaron en los distintos Laboratorios Acreditados, que han colaborado en el desarrollo de la investigación.

La técnica, el uso y los procedimientos normativos, fueron los mismos en todos los laboratorios, según se ha detallado minuciosamente en capítulos anteriores.

#### **4.2.- Determinación del tamaño muestral.**

Como paso previo en cualquier análisis estadístico, se debe determinar el tamaño de la muestra a estudiar. Para calcular el tamaño muestral o valor de n, hay que tener en cuenta que se depende de distintas variables, entre las que se encuentran:

- Tamaño de la población.
- Dispersión de las variables objeto de estudio.
- Variabilidad de los datos a analizar.

#### 4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN

---

- Parámetro objeto de estudio (media, mediana, desviación típica, etc.) según los resultados a los que queramos llegar.

Para ello se plantea inicialmente una estimación, una aproximación, en función del nivel de confianza a obtener y del error máximo admisible (CHAMBERS, CLEVELAND, KLEINER AND TUKEY, 1983).

En este apartado metodológico, es necesario conocer los elementos esenciales del estudio, los objetivos propuestos y el planteamiento y diseño del “experimento”. Los objetivos del proyecto determinan el conjunto de métodos o procedimientos estadísticos que son necesarios utilizar para obtener el análisis de los datos, con una estimación de parámetros de las distribuciones de las variables consideradas, estimación de medidas de asociación entre las distintas variables, contraste de hipótesis formuladas, etc. El diseño del estudio hay que tenerlo en cuenta para determinar el nivel para el que se desea obtener unas conclusiones válidas.

Dados los objetivos de este trabajo, se precisará efectuar estimaciones de múltiples parámetros, siendo los más frecuentes: las medias poblacionales de la Resistencia (R) y la Velocidad (V), así como el grado de asociación entre las dos medidas.

En el cálculo del tamaño muestral, para la estimación del Coeficiente de Correlación lineal de Pearson, el grado de asociación entre dos variables numéricas (características poblacionales), puede cuantificarse mediante la estimación de varios coeficientes. La medida más habitualmente utilizada para el estudio de la correlación, es el *coeficiente de correlación lineal de Pearson*., que mide el grado de asociación lineal entre dos variables cualesquiera. Una vez calculado el coeficiente de correlación entre un par de variables X e Y, debe realizarse un “test de hipótesis”, basado en la distribución t de Student, para valorar la “significación” del coeficiente de correlación y confirmar si existe o no, una asociación estadísticamente significativa entre ambas características. Así mismo, puede obtenerse un intervalo de confianza para el coeficiente de correlación en la población. La validez del test de hipótesis sobre la correlación entre las variables, requiere que al menos una de ellas, tenga una “distribución normal” en la población de la cual procede la muestra. Para el cálculo del intervalo de confianza, se requiere además, que

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

ambas variables presenten una distribución normal (PÉRTEGA DIAZ, S. 2003).

La distribución muestral del Coeficiente de Pearson no es normal, pero bajo la suposición de que las dos variables de estudio (Resistencia – R, Velocidad – V), presentan una distribución gaussiana, el Coeficiente de Pearson puede transformarse para conseguir un valor de  $z$  que sigue una distribución normal. Se suele considerar la transformación de Fisher, con la siguiente expresión para el cálculo de  $n$  (muestra):

$$z = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right)$$

siendo el error estándar de  $z$  aproximadamente igual a  $\frac{1}{\sqrt{n-3}}$ .

Utilizando esta aproximación, se obtiene una fórmula para el cálculo del número de sujetos ( $n$ ) necesarios para la estimación, que nos va a definir el tamaño muestral ( $n$ ) o número de datos de Resistencia (R) y Velocidad (V), necesarios para esta investigación:

$$n = \left( \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} + z_{1-\beta}}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right)} \right)^2 + 3$$

En consecuencia, para el cálculo de  $n$  se precisa conocer:

- La magnitud de la correlación que se desea detectar ( $r$ ), como coeficiente de correlación en la población (valor que es desconocido). Esto es, se precisa tener una idea, a partir de publicaciones o estudios previos, del valor aproximado del coeficiente de correlación existente entre las dos variables a estudio, que al final del trabajo sí que se conocen y que ha resultado ser  $r = 0,677$  (se recuerda que al inicio de la investigación, todavía no se conocía), por lo que se debe estimar o aproximar (y se hace inicialmente con  $r = 0,7$  como valor frecuente en este tipo de investigaciones y que se incorpora a la fórmula).

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

- La seguridad con la que se desea trabajar,  $1 - \alpha$ , o riesgo de cometer un error de tipo I. Generalmente se trabaja con un valor de  $\alpha = 0,05$ .
- La potencia estadística,  $1 - \beta$ , que se quiere para el estudio, o riesgo de cometer un error de tipo II. Es habitual tomar  $\beta = 0,2$  o, equivalentemente, una potencia estadística del 80%.
- Los valores  $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  y  $z_{1-\beta}$ , se obtienen de la distribución normal estándar, en función del nivel de significación y potencia estadística elegidos para el estudio. En particular, para un  $\alpha = 0,05$  (porque buscamos un 95% de confianza) y  $1 - \beta = 0,80$  (lo fijamos en 80, como valor – técnica habitual en estadística), por lo que se tiene que  $z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1,96$  y  $z_{1-\beta} = 0,84$  (Valor obtenido de tablas estadísticas de normalidad - curva “normal” de Gauss).

Por diversas razones, podría producirse la pérdida de algunos casos incluidos inicialmente en el estudio, por lo que las fórmulas anteriores pueden modificarse, con el fin de ajustar el tamaño muestral previsto para el estudio, a estas posibles pérdidas de información (PITA FERNÁNDEZ, S. 2003). Así, asumiendo un porcentaje de pérdidas M, el tamaño de la muestra a estudiar vendrá dado por:

$$n^* = \frac{n}{1 - M}$$

Así pues, si se supone un coeficiente de correlación de al menos 0,4, aplicando la fórmula anterior con  $\alpha = 0,05$  y  $1 - \beta = 0,80$  (seguridad del 95 % y potencia estadística del 80 %) se obtiene:

$$n = \left( \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} + z_{1-\beta}}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right)} \right)^2 + 3 = \left( \frac{1,96 + 0,84}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+0,7}{1-0,7} \right)} \right)^2 + 3 = \left( \frac{2,80}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1,7}{0,3} \right)} \right)^2 + 3 = \left( \frac{2,80}{\frac{1}{2} \ln(5,66)} \right)^2 + 3 = 13,42$$

El valor obtenido de “n” en esta fórmula, sería el número de elementos que necesitamos como mínimo para cada sub-población (y tenemos cuatro subpoblaciones: edad 1 y 2, situación – localización 1 y 2).



#### **4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

---

Este valor de 13,42 unidades, redondeando en 14 unidades x 4 (sub-poblaciones) = 56 unidades, por lo que con cincuenta y seis valores serían suficientes para la realización de este estudio. No obstante, para mejorar la calidad del trabajo se puede incrementar la cantidad de la muestra, por seguridad, se cambia el valor de  $r = 0,7$  por un valor de  $r = 0,5$ , en la fórmula anterior, con lo que el valor de “n” de la muestra que se obtiene ahora es de 29 casos mínimos, para cada subgrupo.

Y si se supone una posible pérdida del 20 % de información, como se planteaba inicialmente, aplicando el mismo método de cálculo, se obtiene que el tamaño muestral necesario para efectuar las pruebas estadísticas es de 36 casos, siendo este tamaño muestral el mínimo requerido en cada sub-población, en la que se desee obtener resultados válidos.

Por tanto, necesitaríamos un mínimo de  $29 \times 4 = 116$  unidades en el primer caso o de  $36 \times 4 = 144$  unidades en el segundo caso, con mayor nivel de seguridad, para conseguir la fiabilidad que se busca. Como disponemos de 180 casos (tras los trabajos de depuración de los 185 datos iniciales disponibles), se obtendrán resultados por encima de la mínima fiabilidad planteada, por lo que los resultados finales obtenidos mejorarán las expectativas inicialmente previstas. (Ver tabla nº 4.1).

#### **4.3. Recopilación de datos.**

Con todos los datos obtenidos (más de dos mil lecturas de velocidad, como resultado del análisis mediante Ultrasonidos (V) y ciento ochenta y cinco Probetas Testigo de Hormigón (R), se realizó una primera selección de aquellos que eran necesarios para la investigación, con valores de ambos ensayos en las mismas piezas, para generar así el proceso de correlación de datos (Ver proceso de inspección y control en fotografía nº 30).

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

**Fotografía nº 30**  
**Trabajos de investigación.**

Imagen del doctorando en el Laboratorio de Ensayos, en el proceso de investigación, para el desarrollo de esta Tesis Doctoral. Véase el proceso de inspección de una probeta testigo de hormigón.

Con todos ellos se confeccionó una amplia tabla de resultados de ensayos, recogiendo todos los parámetros mencionados. Por razones de discreción, no aparecen datos de los Laboratorios Acreditados intervinientes, ni de la identificación de la obra, para garantizar el anonimato (Compromiso previo acordado por el doctorando, con los Laboratorios Acreditados colaboradores), donde se exponen exclusivamente los valores de lecturas de velocidad de ultrasonidos (V) y los valores de resistencias reales del hormigón (R), obtenidos de las probetas testigo, para cada localización (L1 y L2) y para cada edad (E1 y E2) de la estructura. A continuación presentamos los valores – datos, con los que se ha trabajado en el proceso de investigación:

Tabla nº4.1.

<b>TABLA DE DATOS DE PARTIDA</b>					
<b>IDENTIFICACION DEL CASO</b>	<b>LOCALIZACION</b>	<b>EDAD</b>	<b>VELOCIDAD (V)</b>	<b>RESISTENCIA (R)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
1	2	2	3.593	20,10	
2	2	2	3.601	21,80	
3	2	2	3.906	25,30	
4	2	2	3.584	20,70	
5	2	2	3.596	13,10	
6	2	2	3.916	14,10	
7	2	2	3.307	10,20	
8	1	2	3.464	15,90	
9	1	2	3.412	15,10	
10	1	2	2.400	10,30	

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

IDENTIFICACION DEL CASO	LOCALIZACION	EDAD	VELOCIDAD (V)	RESISTENCIA (R)	OBSERVACIONES
11	1	2	3.716	10,30	
12	1	2	3.747	24,10	
13	1	2	4.065	26,40	
14	1	2	3.497	22,20	
15	2	2	2.848	5,10	
<b>16</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3.171</b>	<b>6,80</b>	<b>Valor "outlier"</b>
17	2	2	3.047	6,30	
18	2	2	3.712	10,30	
19	1	2	3.333	19,20	
20	1	2	2.988	20,00	
21	1	2	3.549	21,10	
22	1	2	2.704	9,80	
23	1	2	3.125	11,60	
24	1	2	2.873	12,80	
25	1	2	2.899	13,30	
26	1	2	3.592	12,80	
27	1	2	3.060	14,30	
28	1	2	2.921	17,00	
29	1	2	3.108	16,30	
30	1	2	3.108	18,30	
31	1	2	2.891	24,00	
32	1	2	3.105	14,70	
33	1	2	3.119	13,30	
34	1	2	3.032	12,80	
35	1	2	3.253	10,10	
36	1	2	3.259	12,60	
37	1	2	2.762	11,00	
38	1	1	2.232	5,40	
39	1	1	2.780	6,80	
40	1	1	3.069	8,20	
41	1	1	2.985	8,70	
42	1	1	3.673	8,70	
43	1	1	3.231	8,80	
44	1	1	3.159	9,30	
45	1	1	3.148	9,40	
46	1	1	3.014	9,50	
47	1	1	3.403	9,90	
48	1	1	3.239	10,90	
49	1	1	3.282	14,10	
50	1	1	3.344	14,20	
51	1	1	3.257	14,30	
52	1	1	2.953	14,50	
53	1	1	3.758	15,10	

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

IDENTIFICACION DEL CASO	LOCALIZACION	EDAD	VELOCIDAD (V)	RESISTENCIA (R)	OBSERVACIONES
54	1	1	3.469	15,30	
55	1	1	3.631	21,50	
56	1	1	3.817	23,60	
57	1	2	2.456	18,10	
58	1	2	3.328	11,00	
59	1	2	3.993	20,00	
60	1	2	3.012	8,00	
61	1	2	2.154	24,70	
62	1	2	4.066	26,00	
63	1	2	3.714	12,10	
64	1	2	4.101	10,40	
65	1	2	3.059	13,80	
66	1	2	3.665	16,10	
67	1	2	2.386	12,80	
68	1	2	3.542	17,80	
69	1	2	4.374	19,70	
70	1	2	3.227	13,90	
71	1	2	3.947	22,50	
72	1	2	2.965	16,40	
73	1	2	3.834	14,40	
74	1	2	3.578	19,50	
75	1	2	4.150	24,90	
76	1	2	3.467	18,20	
77	1	2	3.685	16,20	
78	1	2	3.910	19,60	
79	1	2	3.903	17,90	
80	1	2	3.738	11,00	
81	1	2	4.150	25,40	
82	1	2	3.897	14,20	
83	1	2	3.856	12,70	
<b>84</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1.299</b>	<b>10,90</b>	<b>Valor "outlier"</b>
85	1	2	2.933	6,20	
86	1	2	3.478	16,60	
87	1	2	3.629	12,70	
88	1	2	2.409	25,70	
89	1	2	2.463	8,50	
90	1	2	4.304	34,50	
91	1	2	3.226	21,90	
92	1	2	3.421	12,20	
93	1	2	2.266	7,70	
<b>94</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4.440</b>	<b>41,90</b>	<b>Valor "outlier"</b>
95	1	2	4.206	28,00	
96	1	2	2.391	10,20	

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

IDENTIFICACION DEL CASO	LOCALIZACION	EDAD	VELOCIDAD (V)	RESISTENCIA (R)	OBSERVACIONES
97	1	2	3.655	27,80	
98	1	2	3.693	9,30	
99	1	2	3.113	11,60	
100	1	2	2.131	11,20	
101	1	2	3.521	9,70	
102	1	2	3.199	7,10	
103	1	2	3.006	6,00	
104	1	2	2.928	6,80	
105	1	2	3.174	8,80	
106	1	2	3.175	6,90	
107	1	2	3.012	4,50	
108	1	2	2.405	3,20	
109	1	2	3.294	6,50	
110	1	2	2.985	6,00	
111	1	2	2.152	5,30	
112	1	2	3.358	10,90	
113	1	2	3.158	12,30	
114	1	2	3.331	9,30	
115	1	2	2.156	5,40	
116	1	2	2.988	7,90	
117	1	2	3.794	12,70	
118	1	2	3.558	16,30	
119	1	2	3.242	14,90	
120	2	1	3.700	24,70	
121	2	1	3.760	25,40	
122	2	1	3.750	24,80	
123	2	1	3.766	25,30	
124	2	2	3.827	21,80	
125	2	2	4.001	27,90	
126	2	2	3.788	26,30	
127	2	2	3.744	23,30	
128	2	2	3.710	22,90	
129	2	2	3.850	29,10	
130	1	2	3.516	15,30	
131	1	2	3.560	15,50	
132	1	1	3.650	21,40	
133	1	1	3.675	21,90	
134	1	1	3.614	20,00	
135	1	1	3.731	23,50	
136	1	1	3.727	23,10	
137	1	1	3.617	19,50	
138	1	1	3.754	25,00	
139	1	1	3.535	16,80	

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

IDENTIFICACION DEL CASO	LOCALIZACION	EDAD	VELOCIDAD (V)	RESISTENCIA (R)	OBSERVACIONES
140	1	1	3.755	23,30	
141	1	1	3.473	15,20	
142	1	1	3.498	14,30	
143	1	1	3.944	35,80	
<b>144</b>	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>18,80</b>	<b>Inválido</b>
145	1	1	4.293	31,10	
146	1	1	4.103	23,50	
147	1	1	3.742	13,30	
148	1	1	3.986	16,80	
149	2	1	3.881	21,00	
150	2	1	4.360	35,20	
151	2	1	3.880	33,40	
152	2	1	2.700	11,80	
153	2	1	2.540	5,50	
154	2	1	4.040	23,20	
155	2	1	4.340	32,70	
156	2	1	2.840	25,00	
157	2	1	4.280	22,60	
158	2	1	4.230	21,60	
159	2	1	4.290	23,00	
160	2	1	4.795	41,30	
161	2	1	4.318	32,50	
<b>162</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>4.443</b>	<b>41,60</b>	<b>Valor "outlier"</b>
163	2	1	4.160	35,80	
164	1	2	3.800	20,90	
165	1	2	3.561	15,70	
166	1	1	4.030	30,50	
167	1	1	4.059	33,30	
168	1	1	4.089	33,10	
169	1	1	3.887	26,20	
170	2	1	4.239	30,60	
171	2	2	3.534	3,20	
172	2	2	2.336	6,20	
173	2	2	2.404	5,90	
174	1	1	4.227	29,50	
175	1	1	4.440	33,00	
176	2	2	3.424	12,20	
177	2	2	2.159	10,80	
178	2	2	3.154	11,20	
179	1	2	3.947	25,30	
180	1	2	3.938	15,90	
181	1	1	3.355	15,60	
182	1	1	3.235	12,50	

**4. PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

IDENTIFICACION DEL CASO	LOCALIZACION	EDAD	VELOCIDAD (V)	RESISTENCIA (R)	OBSERVACIONES
183	1	2	3.800	20,90	
184	1	2	3.561	15,70	
185	2	1	4.713	35,60	

**INTERPRETACION:**

**L1: Localización 1:** Edificios situados a menos de 500 metros de la costa  
**L2: Localización 2:** Edificios situados a mas de 500 metros de la costa

**E1: Edad 1:** Edificios de menos de 20 años de edad.  
**E2: Edad 2:** Edificios con más de 20 años de edad

**NOTA:**

Los valores “outlier” se han desestimado en el tratamiento estadístico de esta investigación, así como el valor “inválido” al carecer de la velocidad ultrasónica del elemento ensayado.

Con estos datos de partida, se dio inicio al proceso de investigación propiamente dicho y al tratamiento estadístico de los valores obtenidos.

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# 5

## **5.- ANALISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

- 5.1.- Análisis global de los datos**  
(Exploratorios, depuración de datos, estadísticos descriptivos, ajustes y correlaciones)
- 5.2.- Comparación de subpoblaciones**  
(Edad, localización, efecto interacción)
- 5.3.- Análisis estadístico de subpoblaciones**  
(Exploratorio, descriptivo y regresión)
- 5.4.- Análisis estadístico según tipología de edificios**  
(Estructuras tipo: A, B, C y D)
- 5.5.- Análisis de las bandas de confianza**
- 5.6.- Discusión de los resultados**

“La estadística es la ciencia que trata de la recolección, clasificación y presentación de los hechos sujetos a una apreciación numérica como base a la explicación, descripción y comparación de los fenómenos”

Yale y Kendal, 1954





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

---

**5.- ANALISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS.**

Una vez recopilada, seleccionada y ordenada toda la información, con el amplio abanico de datos disponibles, se da inicio al trabajo de investigación propiamente dicha, sobre la “correlación de resultados”, con un claro enfoque científico - técnico, para llegar a la obtención de los resultados finales más fiables.

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, de los valores de Resistencia (R) y de Velocidad (V), para los dos grupos de edad (E1 y E2) y los dos grupos de situación – localización del inmueble (L1 y L2), se ha realizado primero un “análisis exploratorio” que permite tener una visión global de los valores – datos de que disponemos, que de forma muy clara se aprecian en los “gráficos de caja” que se presentan más adelante.

Posteriormente se eliminan los valores “outlier” o valores atípicos, estudiando los valores

## **5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

---

descriptivos y realizando las pruebas de ajuste a la normalidad (Curva de Gauss), todo ello como paso previo a la modelización, al planteamiento de los modelos que se presentan al final de este capítulo.

### **5.1.- Análisis global de los datos.**

En primer lugar se realiza un análisis de los datos globales obtenidos del proceso de toma de datos anteriormente descritos, previamente a su depuración y para su posterior tratamiento estadístico.

#### **5.1.1. Análisis exploratorio.**

##### **a) Del total de los datos obtenidos (185 Unidades)**

Se procede a realizar un primer análisis de los datos, mediante el Diagrama de Caja que se presenta, para los valores de Resistencia (R) y de Velocidad (V), de forma independiente.

Dada esta gran dispersión de algunos valores (valores atípicos o “outlier”) se procede a la eliminación por métodos matemáticos de algunos de ellos, por lo que pasan de 185 valores de resistencia a los 180 valores definitivos (Ya se han indicado cuales, en la Tabla de Datos nº 4.1, presentada en el capítulo anterior).

#### **Depuración de los datos.**

El criterio seguido para la depuración de los datos, ha sido en primer lugar, eliminar el menor número de ellos, ya que la única información de que se dispone sobre las distribuciones de las variables Resistencia (R) y Velocidad (V), es la que contienen la muestra de datos con la que se está trabajando. En consecuencia, procedemos a eliminar solo aquellos que, efectivamente, una vez analizados, se concluye que pudieran deberse a un error de la medida o están claramente dispersos, convenientemente tratados y estudiados.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Para ello se han seguido dos métodos ó criterios para detectar los valores atípicos, “outlier” o extremos, lo que no quiere decir que estos datos sean erróneos, pero sí distorsionan en exceso los resultados finales. Los dos métodos utilizados de forma simultánea, han sido:

- Método analítico, mediante lo que se denominan “BISAGRAS DE TUKEY”.
- Método gráfico mediante el “GRÁFICO DE CAJAS”

La decisión adoptada fue la de eliminar solo aquellos casos que resultaban extremos en ambos criterios, por encontrarse fuera de los denominados “bigotes del gráfico de caja” y más extremos en el método analítico.

Algunos casos como los identificados como 15, 47 y otros presentes, con valores de resistencia muy bajos, pero también bajos en velocidad que desde luego, no son los más extremos, no están fuera de los “bigotes de la Caja” y por tanto, no deben ser despreciados, en un análisis estadístico fiable. En este sentido, se van a analizar los datos inicialmente disponibles (185 valores), como se ha dicho, con el método analítico primero y después, aplicando el método gráfico, para las dos variables R y V.

**Valores de Resistencia (R).**

Se estudia esta variable, por los procedimientos analíticos y gráficos.

**Método analítico:**

N	Válidos	185
	Perdidos	0
Percentiles	5	5,93000
	10	6,86000
	25	10,90000
	50	15,60000
	75	23,15000
	90	29,26000
	95	33,37000

Se analizan los distintos percentiles para los 185 datos iniciales de resistencia (R), obteniendo los

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

siguientes valores:

En cuanto a los valores descriptivos se tiene que:

		Estadístico	Error típ.	
Resistencia	Media	17,30595	,619796	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	16,08313	
		Límite superior	18,52877	
	Media recortada al 5%	16,89595		
	Mediana	15,60000		
	Varianza	71,067		
	Desv. típ.	8,430136		
	Mínimo	3,200		
	Máximo	41,900		
	Rango	38,700		
	Amplitud intercuartil	12,250		
	Asimetría	,673	,179	
	Curtosis	-,022	,355	

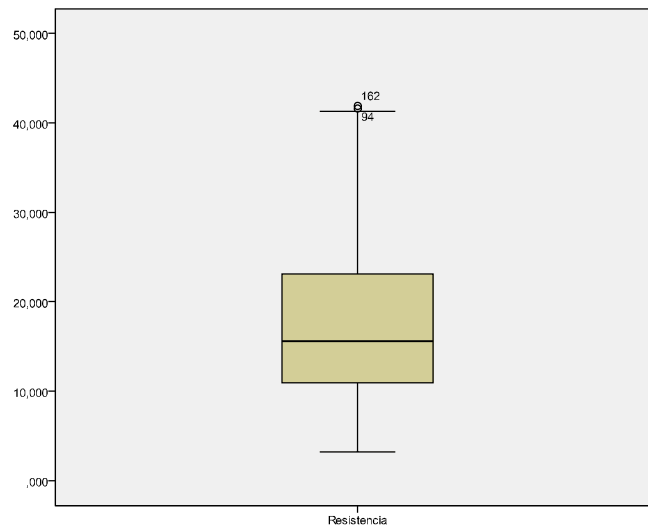
Según esto, en cuanto a valores extremos aparecen los siguientes:

Resistencia		Número del caso	Valor	
	Mayores	1	94	41,900
		2	162	41,600
		3	160	41,300
		4	143	35,800
		5	163	35,800
	Menores	1	171	3,200
		2	108	3,200
		3	107	4,500
		4	15	5,100
		5	111	5,300

**Método gráfico:**

Dibujando el Diagrama de Caja para la Resistencia (R) aparecen los siguientes valores extremos:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**



**Gráfico 5.1. Diagrama de Caja para Resistencia (R).**

Véanse los valores del “bigote de caja” que se consideran “outlier”.

**Valores de Velocidad (V).**

Se efectúa el mismo procedimiento para los datos de Velocidad (V), por los dos métodos citados, analítico y gráfico.

**Método analítico:**

Analizando los percentiles se obtiene:

	Percentiles						
	5	10	25	50	75	90	95
Velocidad	2348	2620	3105	3538	3832	4155	4314

Analizando los valores descriptivos se ve que:

		Estadístico	Error típ.
Velocidad	Media	3447,90761	42,935855
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	3363,19466
		Límite superior	3532,62056

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

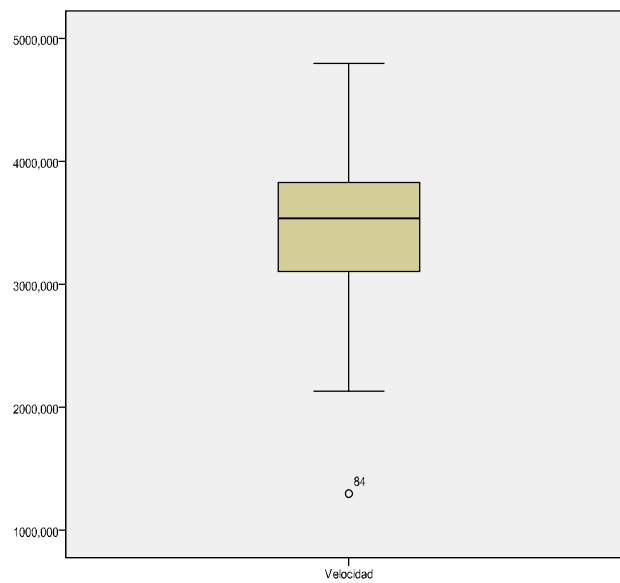
Media recortada al 5%	3465,99638	
Mediana	3538,50000	
Varianza	339201,724	
Desv. típ.	582,410271	
Mínimo	1299,000	
Máximo	4795,000	
Rango	3496,000	
Amplitud intercuartil	726,500	
Asimetría	-,548	,179
Curtosis	,462	,356

Analizando los valores extremos, se observa que:

			Número del caso	Valor
Velocidad	Mayores	1	160	4795,000
		2	185	4713,000
		3	162	4443,000
		4	94	4440,000
		5	175	4440,000
	Menores	1	84	1299,000
		2	100	2131,000
		3	111	2152,000
		4	61	2154,000
		5	115	2156,000

**Método gráfico:**

Dibujando el Diagrama de Caja para las Velocidades (V), aparecen los siguientes valores extremos:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Gráfico 5.2. Diagrama de Caja para Velocidad (R).**

Ver otro de los valores “outlier” detectados y eliminados en el proceso de depuración.

A la vista de todo ello, se confirma que los casos que se eliminan son cinco (5) y que corresponden a los identificados como 16, 84, 94 y 162 por resultar valores extremos (“outlier”) y el caso 144 por resultar incompleto (Falta el valor de la velocidad).

Se pasa por tanto, de una muestra inicial de 185 casos, a los 180 casos finales con los que se va a trabajar durante toda la investigación.

**b) Del conjunto de datos seleccionados (180 unidades).**

Se procede ahora de nuevo a la aplicación de los Diagramas de Caja para ambas variables (R y V) y se observa que ya no aparecen los valores “outlier” y que se tiene la nueva y definitiva posición de los cuartiles y de la mediana, de los 180 datos finalmente seleccionados.



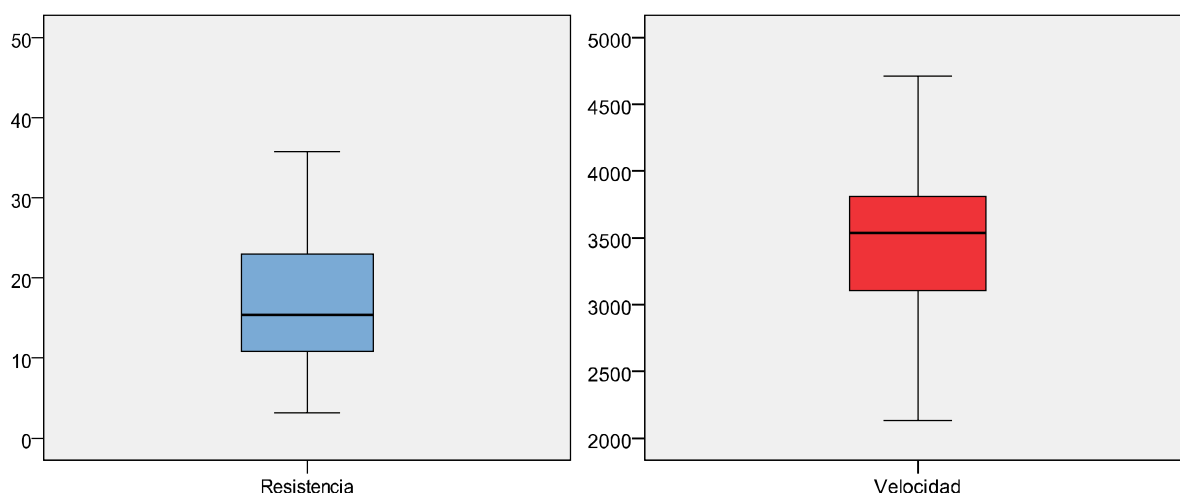
**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Gráfico 5.3. Representación del Gráfico de Caja para la variable: Resistencia (izquierda) y Velocidad (derecha).

**5.1.2.- Estadísticos descriptivos. (Para 180 unidades).**

Se estudian ahora algunos de los valores estadísticos descriptivos, para los 180 datos con los que se está trabajando, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla de resultados de los valores Estadísticos Descriptivos, de las variables Resistencia y Velocidad en el total de la muestra definitiva (180 casos)

Tabla nº 5. 1.

PARÁMETROS	RESISTENCIA (R) N/mm <sup>2</sup>	VELOCIDAD (V) m/seg
Media	16,93	3.441,32
Desviación típica	7,92	547,51
Asimetría	0,49	-0,45
Error típ. de asimetría	0,18	0,18
Curtosis	-0,51	-0,18
Error típ. de curtosis	0,36	0,36
Rango	32,60	2582
Cuartil 1 (Percentil 25)	10,83	3.105,75
Cuartil 2 Mediana	15,40	3.534,50
Cuartil 3 (Percentil 75)	22,98	3.812,75

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

De los valores estadísticos descriptivos expuestos para la muestra definitiva, se comentan los siguientes aspectos más significativos:

- La media obtenida, como valor central o promedio, para la resistencia es de 16,93 N/mm<sup>2</sup> y para la Velocidad de 3.441 m/seg.
- La desviación típica indica la escasa desviación de los datos obtenidos, respecto al valor medio para R y para V (De casi 8 y 548 respectivamente).
- La asimetría negativa significa que el histograma se sale de la Curva de Gauss por la izquierda (más larga la cola). En la asimetría positiva, la cola de la derecha es más larga (Ver en esquema – Curva de Gauss e histograma más adelante).
- Respecto a la curtosis, cuando es igual a cero, significa que la altura del histograma es igual al de la curva normal – Gauss. En este caso es muy similar.
- En cuanto al rango, se aprecia una escasa dispersión entre los valores extremos. (De 33 N/m<sup>2</sup> en Resistencia y 2.582 m/seg. en Velocidad).
- En cuanto a los percentiles, se trata de los porcentajes de valores – datos, que se encuentran por debajo del valor percentil (25 %, 50 % y 75 %). En este caso, el 50% de los valores (mediana) están por debajo de 15.40 N/mm<sup>2</sup> y de 3.534 m/seg.

Procediendo a la exposición gráfica de los datos en un histograma y su comparación con la curva normal, se tendremos:

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

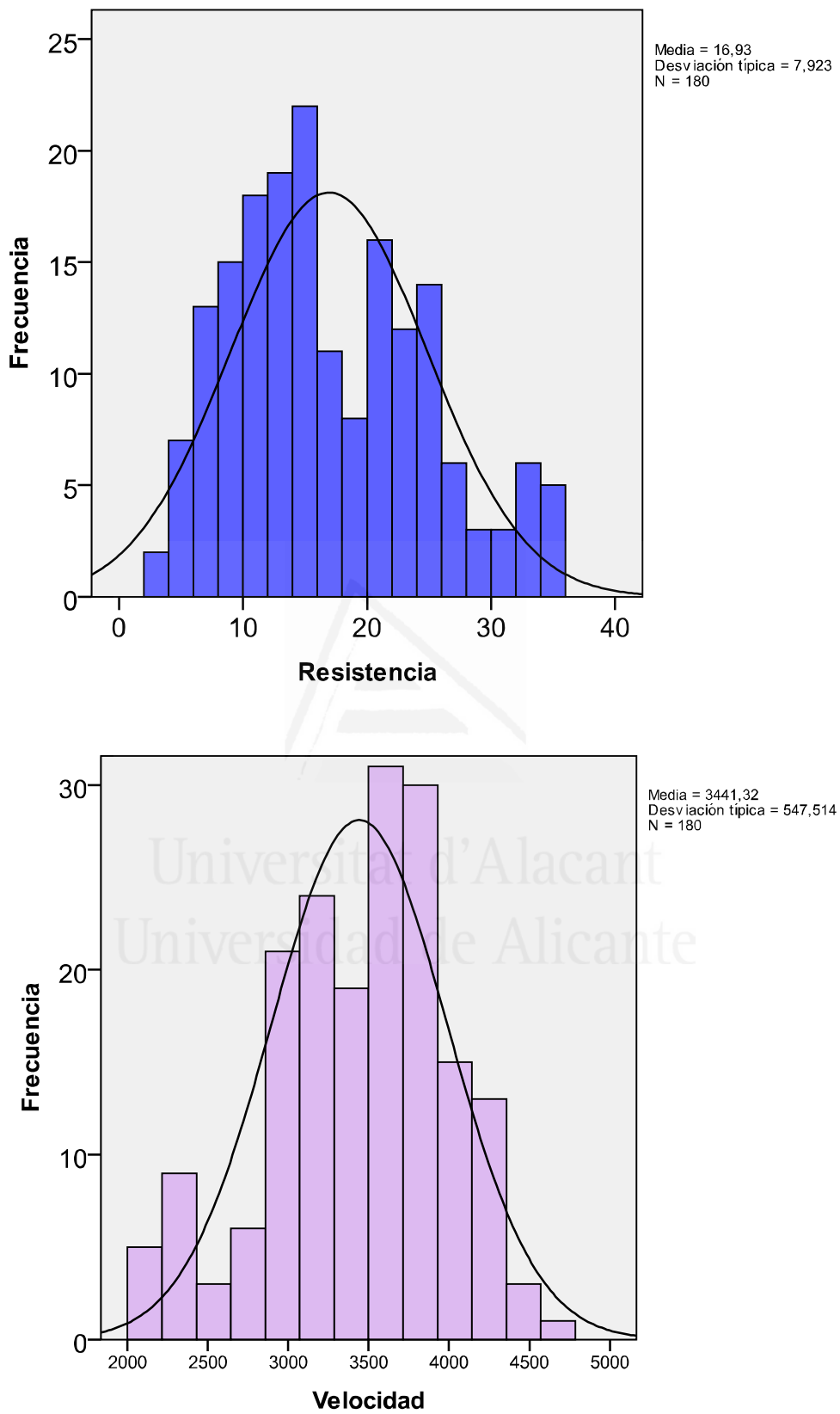


Gráfico 5.4. Histograma y Curva de Gauss de la variable Resistencia (R) y Velocidad (V)

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**5.1.3.- Ajuste a una distribución normal.**

Como se explicó con anterioridad, en el apartado de Metodología, este ajuste o comprobación, se realiza por métodos gráficos (PP - QQ) y por métodos analíticos (Prueba de KOLMOGOROV - SMIRNOV)

**Método gráfico:**

Para ello se utilizan los ya conocidos y citados gráficos P - P y Q - Q, siguientes:

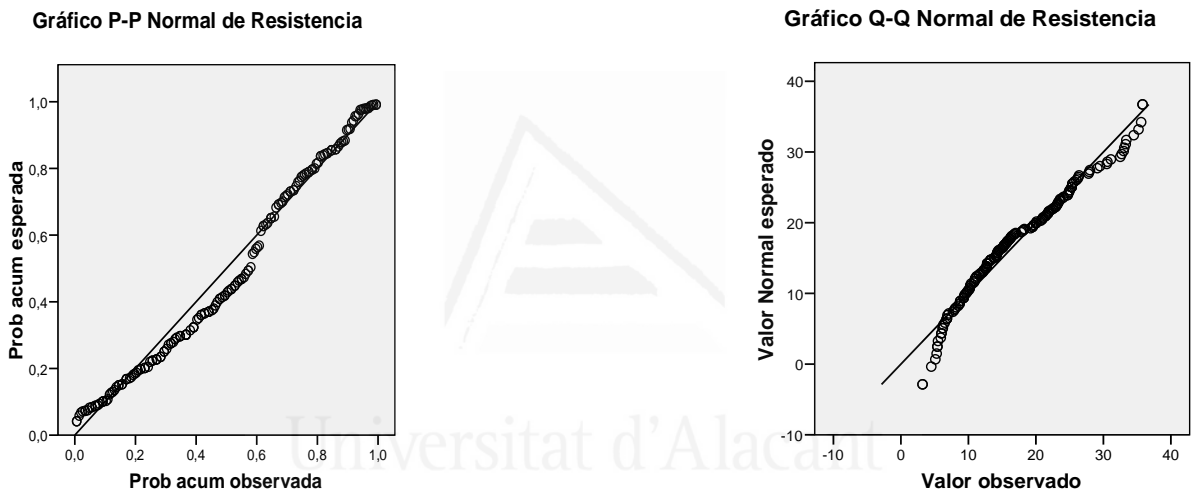


Gráfico 5.5. Gráficos P-P y Q-Q de Resistencia (R)

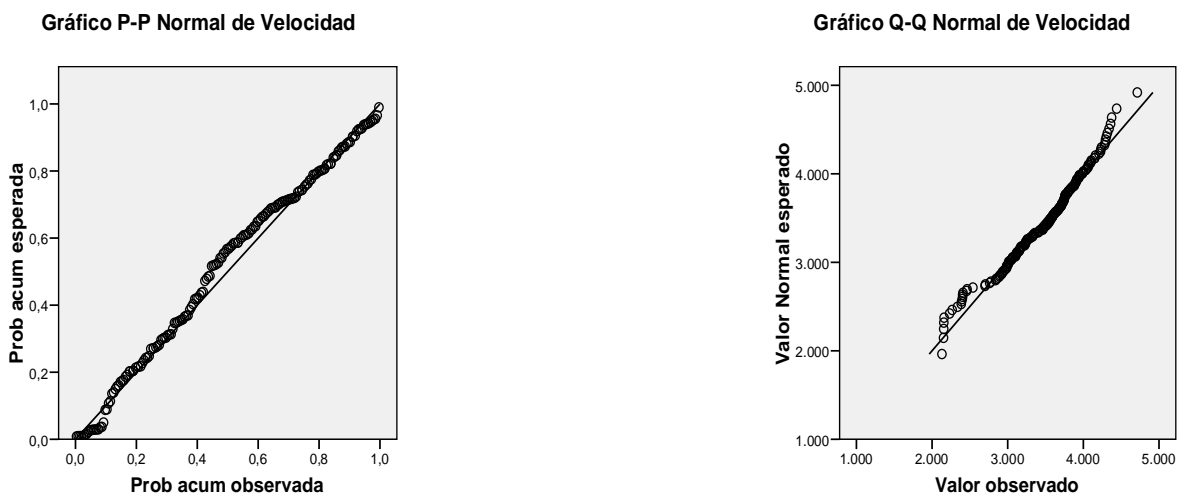


Gráfico 5.6. Gráficos P-P y Q-Q de Velocidad (V)

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Se aprecia en todos ellos su gran ajuste a “la normalidad”, tanto en los valores de Resistencia (R) como en los de Velocidad (V), lo que confirma la normalidad.

Hasta ahora se ha expuesto una visión gráfica, para la comprobación de la normalidad. A continuación se contrasta estadísticamente:

**Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra**

Parámetros		Velocidad (V)	Resistencia (R)
N (muestra)		180	180
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	3.441,3222	16,9283
	Desviación típica	547,51440	7,92304
Diferencias más extremas	Absoluta	,073	,088
	Positiva	,052	,088
	Negativa	-,073	-,051
Z de Kolmogorov - Smirnov		,976	1,177
Sig. asintót. (bilateral): P-valor		<b>,296</b>	<b>,125</b>

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Se obtiene un “p-valor” de 0,125 para Resistencia (R) y de 0,296 para Velocidades (V), por lo que el resultado obtenido en el contraste de Kolmogorov-Smirnov permite NO RECHAZAR la hipótesis nula de normalidad, para las variables de Resistencia (R) y de Velocidad (V), con un p-valor mucho mayor de 0,05.

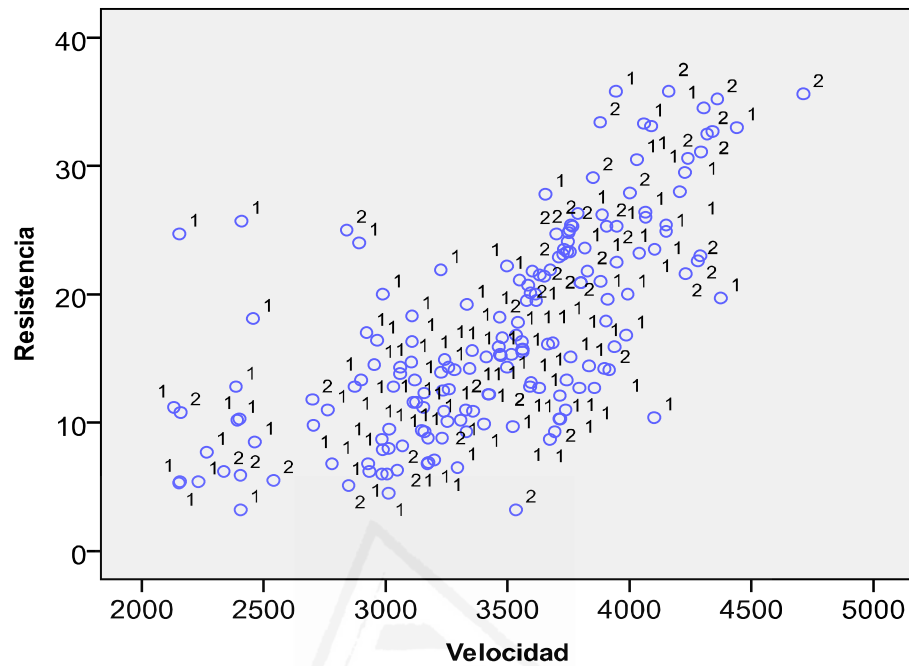
O sea, que se acepta la hipótesis planteada, que era que la variable se distribuye según una curva normal. Si no fuera normal, no se podría continuar con este planteamiento de investigación, válido exclusivamente para distribuciones “normales” (Ajustadas a la Curva de Gauss).

**5.1.4.- Relación bivalente.**

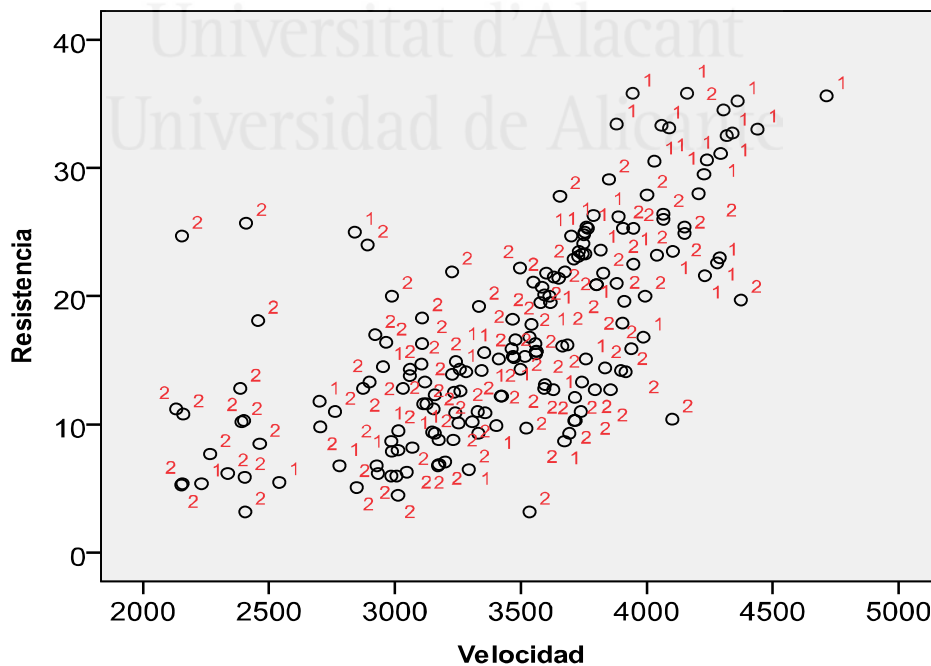
A continuación se visualizan todos los datos obtenidos, con las etiquetas de análisis de las

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

distintas subpoblaciones estudiadas de situación – localización del edificio (L1 y L2) y de edad (E1 y E2).



**Gráfico 5.7** Diagrama de dispersión bivalente de las variables: Resistencia y Velocidad. Etiqueta = Situación.



**Gráfico 5.8** Diagrama de dispersión bivalente de las variables: Resistencia y Velocidad. Etiqueta = Edad.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

NOTA: En ambos gráficos, junto a cada punto aparece la Identificación de 1 y 2, según la situación - localización y la edad del inmueble.

**5.1.5.- Relación entre las variables Resistencia (R) y Velocidad (V).**

Se procede a estudiar ahora la relación entre las dos variables, la correlación existente entre ellas, con los valores de la muestra de que disponemos.

**Correlación:**

		Velocidad	Resistencia
Velocidad	Correlación de Pearson	1	<b>R = r = ,677**</b>
	Sig. (bilateral)		,000
	N	180	180

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Se ha estudiado con esto la correlación de resultados basados en los valores de la muestra y su aplicación en la correlación de valores en el total de la población, que evidentemente se desconocen.

Esta correlación es significativa al nivel 0,01, o lo que es lo mismo, la probabilidad de equivocación, en la correlación es solo del 1% (el citado nivel 0,01).

Por ello, este resultado es aceptable, por las distintas variables que proporcionan los diferentes tipos de edificios estudiados, criterios de laboratorios, técnicas utilizadas, y otras situaciones no medibles.

**Ajuste de un modelo de regresión.**

Se plantean ahora distintos tipos de ajustes, según los modelos de regresión lineal y los modelos de regresión cuadrática, para comprobar la idoneidad de cada uno de ellos.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**a) Regresión lineal.**

Se plantea un conocido modelo de expresión:

$Resistencia = A + B * Velocidad$
-----------------------------------

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,677	<b>,459</b>	,456	5,846

La variable independiente es la Velocidad.

Lo que significa que el 45'9 % de la variable Resistencia (R), se explica por la variable de la Velocidad (V).

**Aplicación ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	5152,938	1	5152,938	150,767	,000
Residual	6083,707	178	34,178		
Total	11236,645	179			

La variable independiente es la Velocidad.

Lo que explica que es muy significativo, porque la “significancia” es de 0'000 y por tanto < 0'05

Se calculan ahora los coeficientes, para su incorporación a la expresión dada anteriormente:

**Coeficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta		
Velocidad	<b>(B) ,010</b>	,001	,677	12,279	,000
(Constante)	<b>(A) -16,795</b>	2,781		-6,040	,000

Aplicando estos coeficientes, la ecuación de la recta de regresión lineal será:



**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

$$\text{Resistencia media estimada} = -16,795 + 0,010 * \text{Velocidad}$$

(Para todas las estructuras: 180 valores)

Se debe aclarar que con esta expresión no se obtiene una resistencia real, sino una resistencia media estimada, en base a los datos de que se dispone, a través de la muestra estudiada.

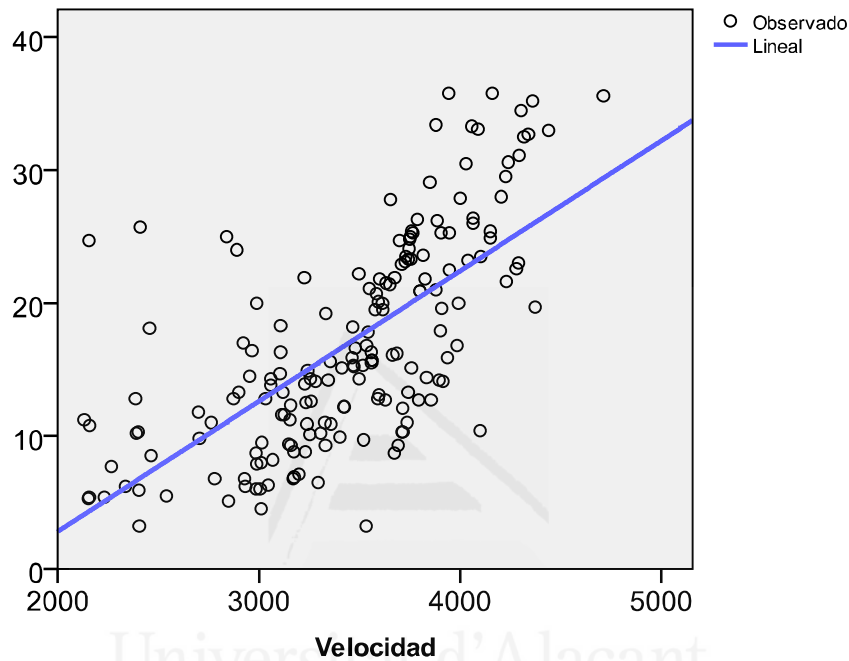


Gráfico 5.9 Representación gráfica de la recta de regresión mínimo cuadrática

En este gráfico se observa la nube de puntos (valores observados, datos disponibles) y la recta de regresión obtenida (para la muestra de los 180 valores estudiados).

**b) Regresión cuadrática.**

En este caso, se plantea un modelo de expresión conocida del tipo:

$$\text{Resistencia media estimada} = A + B * \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2$$

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,740	<b>,548</b>	,543	5,356

La variable independiente es la Velocidad.

En este modelo se aprecia un  $R^2$  de 0,548, mayor que en el modelo lineal, lo que significa que este modelo es más adecuado para el caso que se está analizando.

**Aplicación ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	6159,653	2	3079,827	107,372	,000
Residual	5076,992	177	28,684		
Total	11236,645	179			

La variable independiente es Velocidad.

El valor de la significancia 0,000 confirma la validez de este modelo.

**Coefficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta		
Velocidad	<b>(B) -,032</b>	,007	-2,207	-4,509	,000
Velocidad ** 2	<b>(C) 6,286E-6</b>	,000	2,900	5,924	,000
(Constante)	<b>(A) 50,529</b>	11,646		4,339	,000

Aplicando estos coeficientes, la ecuación del modelo cuadrático estimado:

$$\text{Resistencia media estimada} = 50,529 - 0,032 * \text{Velocidad} + 0,000006286 * (\text{Velocidad})^2$$

Se trata de una resistencia media estimada, en base a todos los datos con los que se ha trabajado, de todas las estructuras analizadas. (Para las 180 unidades de probetas testigo).

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Se presenta a continuación el esquema de la curva de Correlación Cuadrática tipo, para todas las estructuras analizadas:

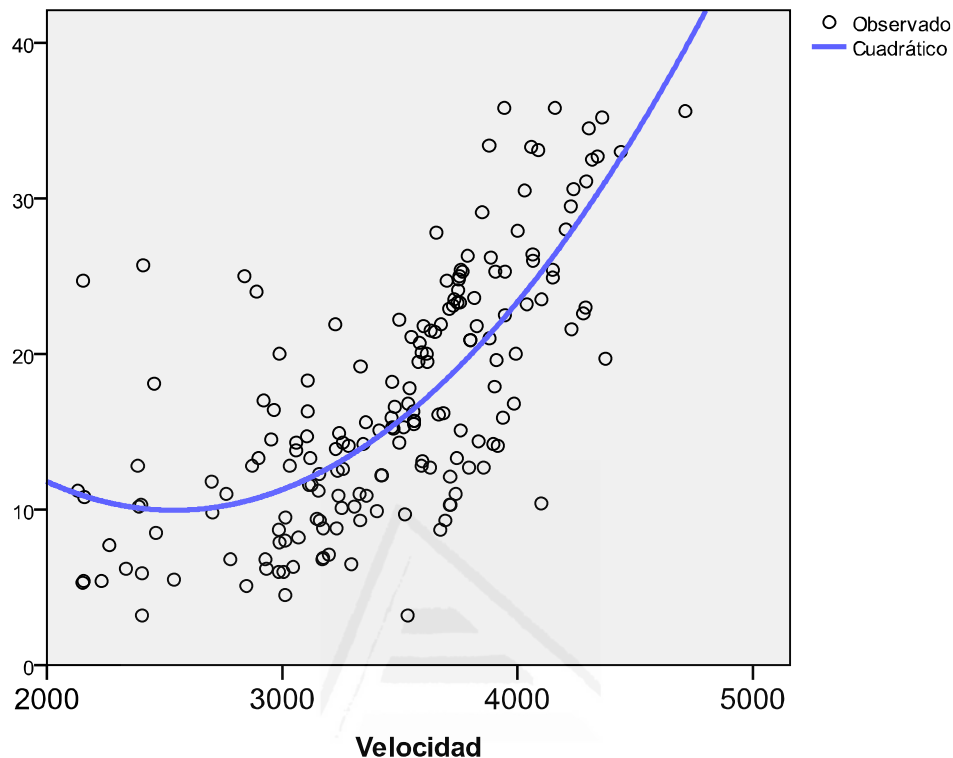


Gráfico 5.10 Representación gráfica de la función cuadrática de regresión

En esta gráfica se observa la nube de puntos (valores observados, datos disponibles) y la curva de regresión cuadrática obtenida (para la muestra completa final de los 180 valores estudiados).

### 5.2. - Comparación de subpoblaciones.

Analizando las diferencias entre los distintos grupos de subpoblaciones, con los mismos criterios anteriores tenemos que:

#### **5.2.1.- Contraste de igualdad de medias: Factor = Localización.**

Se procede a estudiar ahora los resultados estadísticos descriptivos de las variables (R y V) para las cuatro subpoblaciones, según el factor de localización. Analizando los datos disponibles se obtiene que:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****Estadísticos Descriptivos: Resistencia (R)**

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	141	16,130	7,3822	,6217	14,901	17,360
2	44	21,073	10,3741	1,5640	17,919	24,227
Total	185	17,306	8,4301	,6198	16,083	18,529

**Test de Barlet (Prueba de homogeneidad de varianzas): Resistencia (R)**

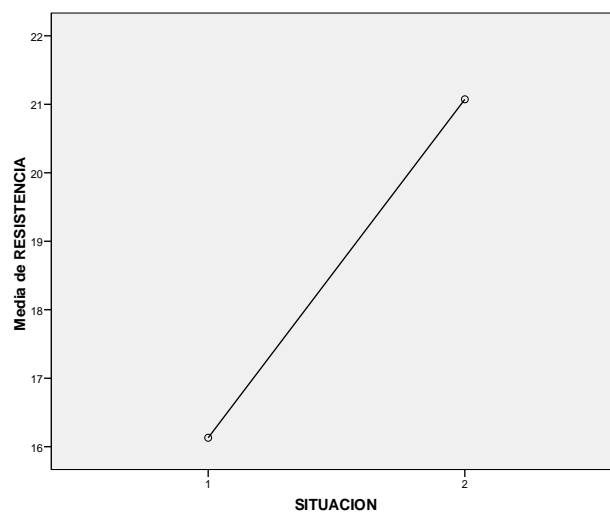
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
9,304	1	183	,003

**Aplicación ANOVA: Resistencia (R)**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	819,117	1	819,117	12,229	,001
Intra-grupos	12257,246	183	66,979		
Total	13076,363	184			

Por tanto se acepta que existe diferencia entre las resistencias medias de los dos grupos de población, según su localización, dado que la “significancia” con valor 0,001 es menor de 5%.

Gráficamente se identifica como:



**Gráfico 5.11 Representación gráfica de los valores medios para cada grupo definido por la localización (Para resistencia)**

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Estadísticos Descriptivos: Velocidad (V)**

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	140	3379,84	552,898	46,728	3.287,45	3.472,23
2	44	3664,48	626,355	94,427	3.474,05	3.854,91
Total	184	3447,91	582,410	42,936	3.363,19	3.532,62

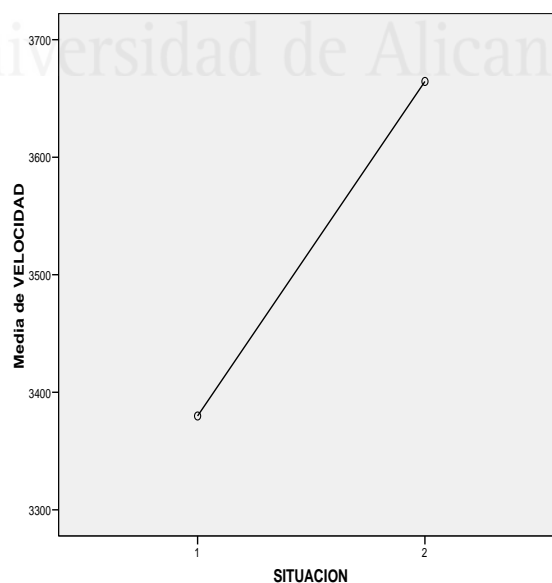
**Test de Barlet (Prueba de homogeneidad de varianzas): Velocidad (V)**

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,429	1	182	,513

**Aplicación ANOVA: Variable dependiente: Velocidad (V). Factor localización.**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2712299,909	1	2712299,909	8,316	,004
Intra-grupos	59361615,520	182	326162,723		
Total	62073915,429	183			

Con lo que se rechaza que son subpoblaciones iguales, por tanto, se acepta que son poblaciones de comportamiento diferente, lo que significa que se confirma que la diferencia entre los valores medios de velocidad, en los distintos tipos de edificios, es debida a su localización – situación y no a la aleatoriedad muestral.



**Grafico 5.12. Representación gráfica de los valores medios de cada grupo definidos por la localización – situación (Para velocidad de ultrasonidos).**

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****5.2.2.- Contraste de igualdad de medias: Factor = Edad.**

Se procede ahora a estudiar los resultados estadísticos descriptivos para las dos variables (R y V), para las cuatro subpoblaciones; según el factor de Edad. Analizando los datos disponibles, se observa que:

**Estadísticos Descriptivos: Resistencia (R)**

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	62	20,5823	8,84327	1,12310	18,3365	22,8280
2	118	15,0085	6,66893	,61392	13,7926	16,2243
Total	180	16,9283	7,92304	,59055	15,7630	18,0937

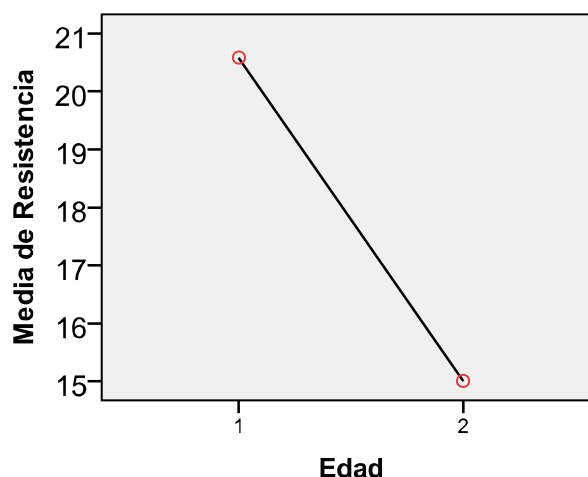
**Test de Barlet (Prueba de homogeneidad de varianzas): Resistencia (R)**

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
9,872	1	178	,002

**Aplicación ANOVA: Resistencia (R)**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1262,703	1	1262,703	22,535	,000
Intra-grupos	9973,942	178	56,033		
Total	11236,645	179			

Por tanto, se acepta que existe diferencia entre las resistencias medias de los dos grupos - poblaciones, según la edad, dado que la “significancia” con valor 0, es menor de 5 %.



**Gráfico 5.13** Representación gráfica de los valores medios para cada grupo definido por la edad. (Para Resistencias)

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Estadísticos Descriptivos: Velocidad (V)**

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1	62	3.655,6452	510,42833	64,82446	3.526,0206	3.785,2697
2	118	3.328,7119	534,47100	49,20204	3.231,2698	3.426,1539
Total	180	3.441,3222	547,51440	40,80931	3.360,7930	3.521,8515

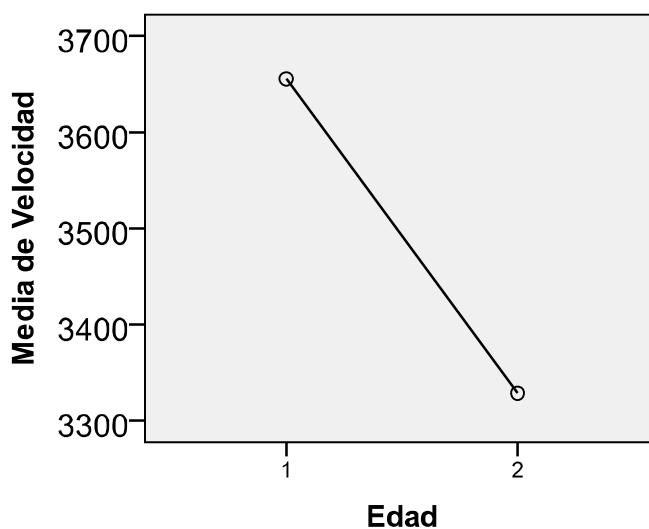
**Test de Barlet (Prueba de homogeneidad de varianzas): Velocidad (V)**

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,469	1	178	,494

**Aplicación ANOVA: Variable dependiente: Velocidad (V). Factor: Edad**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	4344296,914	1	4344296,914	15,681	,000
Intra-grupos	49314894,397	178	277049,969		
Total	53659191,311	179			

Con lo que se rechaza que son subpoblaciones iguales, por tanto se acepta que son poblaciones de comportamiento diferente, lo que significa que se confirma que la diferencia entre los valores medios de Velocidad (V), en los distintos tipos de edificios, es debida a la edad y no a la aleatoriedad muestral.



**Gráfico 5.14** Representación gráfica de los valores medios para cada grupo definido por la edad. (Para Velocidad)

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Se aprecia en todos los gráficos una importante bajada de Resistencia (R) y Velocidad (V) en los dos casos 1 y 2, según la localización del edificio (L1 y L2) y con la edad de la estructura (E1 y E2).

**5.2.3.- Efecto de interacción entre la edad y la localización.**

Se trata de ver ahora la interacción entre los dos factores (situación – localización y edad del inmueble). Se recuerda que la identificación de cada edificio, se realizaba con los siguientes criterios y con la denominación de:

- L1: Localización - Situación 1 - Cerca de la costa (< 500 m).
- L2: Localización - Situación 2 - Lejos de la costa (> 500 m).
- E1: Edad 1 - Menor de 20 años (Mas joven).
- E2: Edad 2 - Mayor de 20 años (Mas antiguo).

**Variable dependiente: Resistencia (R).**

**Pruebas de los efectos inter-sujetos.** Variable dependiente: **Resistencia (R)**

Tabla nº 5.2.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta al cuadrado parcial
Modelo corregido	2005,810 <sup>a</sup>	3	668,603	12,748	,000	,179
Intersección	42602,415	1	42602,415	812,280	,000	,822
Situación	491,884	1	491,884	9,379	,003	,051
Edad	1452,403	1	1452,403	27,692	,000	,136
Situación * Edad	374,804	1	374,804	7,146	,008	,039
Error	9230,836	176	52,448			
Total	62818,970	180				
Total corregida	11236,645	179				

a. R cuadrado = ,179 (R cuadrado corregida = ,165)

En el resultado de efecto inter-sujetos para localización/edad, se obtiene un valor de 0'039 que es



**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

menor de 0'05 y por tanto, se confirma que existe una clara interacción entre estos dos factores, es decir, que se confirma que a mayor distancia de la costa y a menor edad de la estructura, mayores resistencias (R).

Continuando con el estudio de los resultados de la interrelación de las variables de localización y edad (para los valores de resistencias), se obtiene:

**Medias Marginales estimadas:**

Con este planteamiento se estudia qué ocurre con los valores medios, a cada uno de los subgrupos por separado primero (situación y edad) o con esos dos factores en interacción, después.

**1. Localización – Situación.**

Variable dependiente: **Resistencia (R)**

Situación	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	16,599	,666	15,285	17,912
2	20,596	1,123	18,380	22,811

**2. Edad.**

Variable dependiente: **Resistencia (R)**

Edad	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	22,031	,998	20,062	24,000
2	15,163	,841	13,503	16,824

**3.- Situación \* Edad.**

Variable dependiente: **Resistencia**

Situación	Edad	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	18,288	1,104	16,109	20,468
	2	14,909	,743	13,443	16,376
2	1	25,774	1,661	22,495	29,053
	2	15,417	1,510	12,437	18,398

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

De estos valores se deduce que se acepta que existen diferencias entre las resistencias medias, para los distintos tipos de estructuras.

**Variable dependiente: Velocidad (V).****Pruebas de los efectos inter-sujetos.** Variable dependiente: Velocidad (V).

Tabla nº 5. 3.

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Eta al cuadrado parcial
Modelo corregido	5914250,044 <sup>a</sup>	3	1971416,681	7,267	,000	,110
Intersección	1,542E9	1	1,542E9	5682,455	,000	,970
Situación	1343657,440	1	1343657,440	4,953	,027	,027
Edad	4064867,911	1	4064867,911	14,984	,000	,078
Situación * Edad	441147,684	1	441147,684	1,626	,204	,009
Error	47744941,267	176	271278,075			
Total	2,185E9	180				
Total corregida	53659191,311	179				

a. R cuadrado = ,110 (R cuadrado corregida = ,095)

En el resultado del efecto inter-sujetos, para situación - edad de la estructura, se obtiene un valor a 0,09 menor que 0,05 por lo que se acepta la hipótesis de que existe una clara interacción entre estos dos factores, o sea que se confirma que a mayor distancia de la costa y a menor edad, mayores velocidades (V).

Continuando con el estudio de los resultados de la interrelación de variables de la situación y edad (para los valores de velocidad) se obtiene:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****Medias marginales estimadas:**

Con este planteamiento se estudia qué ocurre con los valores medios, a cada uno de los subgrupos por separado primero (situación y edad) o con esos dos factores en interacción, después.

**1. Localización – Situación.**Variable dependiente: **Velocidad (V)**

Situación	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	3.433,140	47,865	3.338,676	3.527,604
2	3.642,024	80,735	3.482,691	3.801,357

**2. Edad.**Variable dependiente: **Velocidad (V)**

Edad	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
			Límite inferior	Límite superior
1	3.719,240	71,740	3.577,658	3.860,822
2	3.355,924	60,519	3.236,487	3.475,361

**3. Situación \* Edad.**Variable dependiente: **Velocidad (V)**

Situación	Edad	Media	Error típ.	Intervalo de confianza 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	1	3.554,953	79,428	3.398,200	3.711,707
	2	3.311,326	53,437	3.205,866	3.416,787
2	1	3.883,526	119,490	3.647,709	4.119,343
	2	3.400,522	108,603	3.186,189	3.614,854

De estos valores se deduce que existen diferencias entre las velocidades de ultrasonidos, para los distintos tipos de estructuras:

Hasta aquí se ha realizado un análisis concreto de la realidad, con todos los datos disponibles de la seleccionada, para todas las edades y todas las situaciones – localizaciones de los inmuebles chequeados (No se ha modelizado nada todavía, para cada sub población). Con esto se estudian

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

los datos disponibles y servirán de base para las propuestas de modelos.

### 5.3.- Análisis estadístico de subpoblaciones.

Una vez analizados los datos globales del total de la muestra para las distintas variables, se procede ahora al estudio estadístico de las distintas subpoblaciones, de forma independiente, primero para la Localización (L1 y L2) y luego para la Edad (E1 y E2).

#### 5.3.1.- Subpoblaciones definidas por su situación – localización.

Se procede ahora al análisis de las subpoblaciones definidas por la situación - localización de la estructura.

#### Análisis exploratorio.

Si se analiza esta subpoblación de forma grafica, con los ya conocidos Diagramas de Caja, se aprecia:

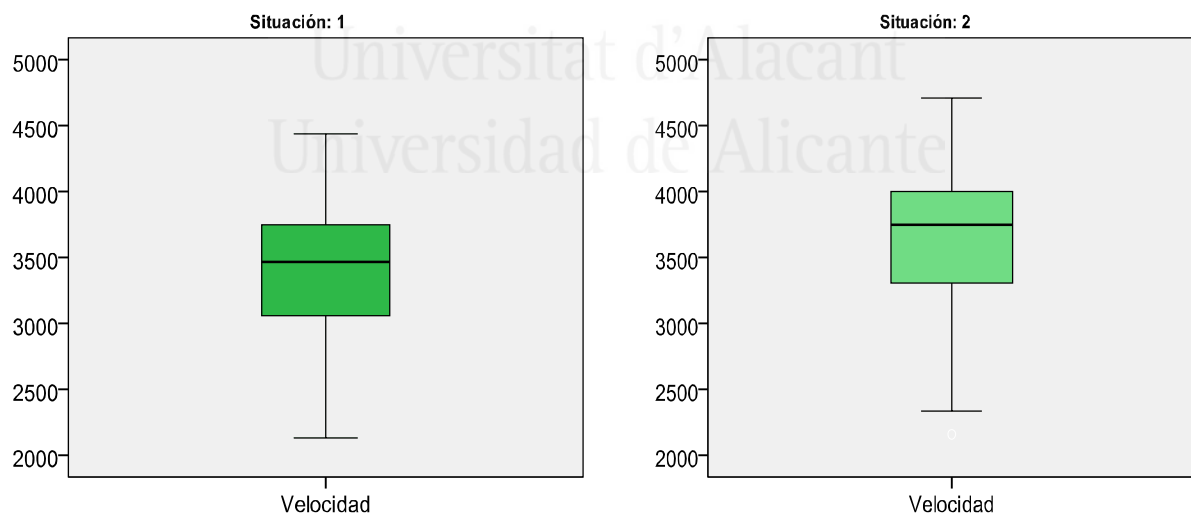
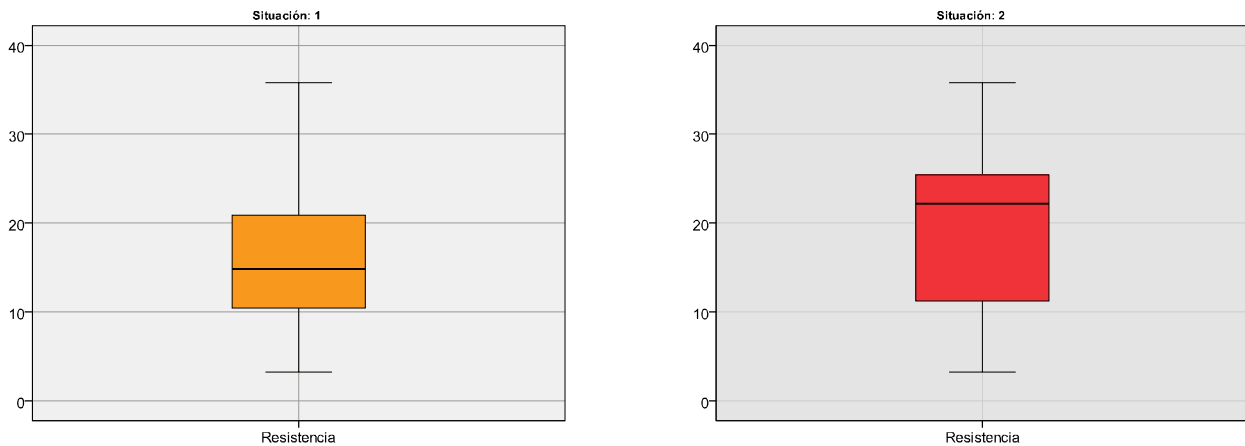


Gráfico 5.15. Diagramas de Caja para velocidad en las dos submuestras definidas por la situación - localización.

Se aprecia claramente la diferencia de posición del valor de la mediana, para las dos situaciones (L1 y L2) de la estructura, así como la posición de los distintos cuartiles, para el total de la muestra.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Comparando otras subpoblaciones se tienen los siguientes Diagramas de Caja:



**Gráfico 5.16. Diagrama de caja para valores de Resistencia por situación 1 y 2**

Véase en ambos gráficos la posición de la mediana (Percentil 50 %) para la Resistencia (R) en la localización – situación 1 y 2, de las estructuras analizadas (180 valores).

### Análisis descriptivo.

Los valores estadísticos descriptivos (para N = 138 y N = 42) con los que se está trabajando, analizados por la situación - localización, se representan en las dos siguientes tablas:

### Estadísticos Descriptivos: situación – localización (L1 y L2).

Tabla nº 5.4.

Situación 1 (L1)	Percentiles	Resistencia (R) N/mm <sup>2</sup>	Velocidad (V) m/seg
N		138	138
Media		15,96	3387,24
Desviación típica.		7,11	519,90
Asimetría		0,67	-0,46
Error típico de asimetría		0,21	0,21

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Curtosis		-0,03	-0,11
Error típico de curtosis		0,41	0,41
Rango		32,60	2309,00
Percentiles	25	10,38	3059,75
Mediana	50	14,80	3465,50
	75	20,90	3748,75

Tabla nº 5. 5.

Situación 2 (L2)	Percentil	Resistencia (R) N/mm <sup>2</sup>	Velocidad (V) m/seg
N		42	42
Media		20,10	3619,02
Desviación típica.		9,57	602,82
Asimetría		-0,18	-0,76
Error típico de asimetría		0,37	0,37
Curtosis		-1,06	0,09
Error típico de curtosis		0,72	0,72
Rango		32,60	2554,00
Percentiles	25	11,10	3273,00
Mediana	50	22,20	3747,00
	75	25,63	4010,75

De los valores descriptivos expuestos, se procede comentar los siguientes aspectos más significativos:

- La media obtenida, como valor central o promedio, para la resistencia de 15,96 N/mm<sup>2</sup> en localización 1 y de 20,10 N/mm<sup>2</sup> en localización 2. Respecto a los valores de Velocidad (V) son 3.387 y 3.619 m/seg. respectivamente.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

- La desviación típica nos indica la escasa desviación de los datos respecto al valor medio para R (De casi 7 y 10 N/mm<sup>2</sup> respectivamente). Y para V (de 520 y 603 m/seg. respectivamente).
- La asimetría negativa significa que el histograma se sale de la curva por la izquierda (más larga la cola). En la asimetría positiva, la cola de la derecha es más larga (Ver los valores que manifiestan una escasa asimetría).
- Respecto a la curtosis, cuando es igual a cero significa que la altura del histograma es igual al de la curva normal - Gauss. En este caso con valores muy pequeños.
- En cuanto al rango, se aprecia una amplia banda entre los valores extremos. (De 33 N/mm<sup>2</sup> para R, en las dos situaciones y de 2.309 y 2.554 m/seg. para V respectivamente)
- En cuanto a los percentiles, se trata de los porcentajes de valores – datos, que se encuentran por debajo del valor percentil (25 %, 50 % y 75 %). En este caso, la mediana (percentil 50%) nos indica que el 50 % de los valores de R están por debajo de 14,80 N/mm<sup>2</sup> en localización 1 y de 22,20 N/mm<sup>2</sup> en localización 2. La mediana de V se encuentra en 3.466 y 3.747 respectivamente. Mucho más altos los valores en las estructuras más alejadas de la costa.

Ya se han estudiado todos los valores y ahora se plantean los modelos de regresión para los distintos grupos de subpoblaciones (Localización 1 y 2) objeto de esta investigación a través de distintos modelos de regresión lineal y cuadrática:

**Modelo de Regresión Lineal (Para la subpoblación de situación)**

Se plantea un modelo con la siguiente expresión matemática, ya conocida y utilizada en modelos anteriores:

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad}$$

Se obtienen los siguientes parámetros para este modelo:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****Resumen del modelo**

Situación	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1	,616	,380	,375	5,620
2	,773	,597	,587	6,154

La variable independiente es la Velocidad.

Se comprueba que el modelo es más representativo para los edificios del grupo 2 (>500 metros de la costa), dado su mayor valor de  $R^2$  de 0,597 respecto al valor de 0,380 de los edificios más cercanos (lo que supone casi un 60 %).

**Aplicación ANOVA.**

Situación		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2631,008	1	2631,008	83,290	,000
	Residual	4296,056	136	31,589		
	Total	6927,064	137			
2	Regresión	2242,904	1	2242,904	59,228	,000
	Residual	1514,765	40	37,869		
	Total	3757,670	41			

La variable independiente es la Velocidad.

La significancia de valor igual a 0 nos confirma que se acepta el modelo planteado, por lo que se calculan ahora los coeficientes para este modelo de **Regresión Lineal**, obteniendo:

**Coefficientes**

Situación		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típico	Beta		
1	Velocidad	(A) ,008	,001	,616	9,126	,000
	(Constante)	(A) -12,589	3,165		-3,978	,000
2	Velocidad	(B) ,012	,002	,773	7,696	,000
	(Constante)	(A) -24,301	5,847		-4,156	,000

Aplicando estos coeficientes a la expresión matemática dada, para el modelo citado de **Regresión Lineal**, se obtiene:



**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

$$R = A + B * V$$

**Situación – Localización 1 (L1):**

$$\text{Resistencia media estimada} = -12,589 + 0,008 * \text{Velocidad}$$

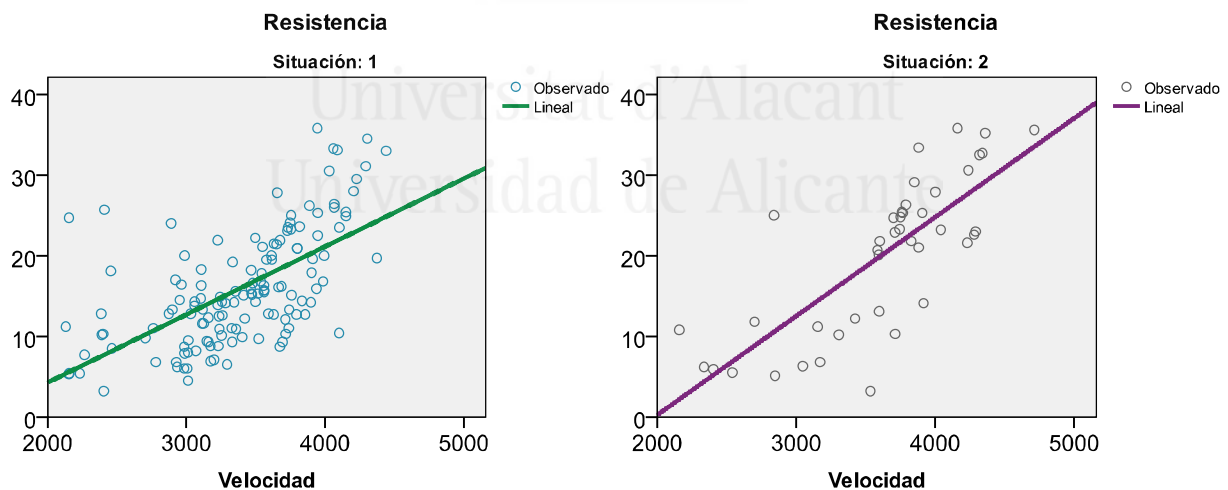
**Situación – Localización 2 (L2):**

$$\text{Resistencia media estimada} = -24,301 + 0,012 * \text{Velocidad}$$

Se recuerda que el coeficiente B indica la pendiente en la recta, que como se aprecia es mayor en la situación 2 que en la localización 1, como gráficamente se observa a continuación.

El valor que se consigue para R, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente se espera obtener, conociendo la velocidad de propagación de ultrasonidos (V) de las piezas que se vayan a analizar.

Analizando su resultado gráficamente, se tiene:



**Gráfico 5.17.- Representaciones gráficas de resistencia y velocidad, en el modelo lineal, para los dos grupos de situación – localización 1 y 2 de las estructuras estudiadas.**

En estos dos gráficos se aprecia la nube de puntos (valores observados, datos para cada uno de los grupos de localización) y la recta de regresión lineal obtenida. Véase una mayor pendiente para la Localización 2. (Edificios más alejados de la costa).

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****Modelo de Regresión Cuadrática (Para la Subpoblación de Situación - localización).**

Se plantea un modelo de expresión ya conocido y utilizado con anterioridad:

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2$$

Se obtienen los siguientes parámetros para este modelo:

**Resumen del modelo**

Situación	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1	,696	,484	,476	5,146
2	,793	,630	,611	5,974

La variable independiente es la Velocidad.

Se aprecia que mejora este modelo de Regresión Cuadrática respecto al lineal, por los mejores resultados obtenidos del valor estadístico de  $R^2$  y especialmente para la localización - situación 2 (L2).

**Aplicación ANOVA**

Situación		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	3352,193	2	1676,097	63,295	,000
	Residual	3574,871	135	26,481		
	Total	6927,064	137			
2	Regresión	2365,926	2	1182,963	33,149	,000
	Residual	1391,743	39	35,686		
	Total	3757,670	41			

La variable independiente es la Velocidad.

Con estos valores de significancia igual a 0 se confirma que el modelo es aceptado. Se procede ahora a calcular los coeficientes para este modelo de **Regresión Cuadrática** y se obtiene:

**Coeficientes**

Situación	Coeficientes no estandarizados	Coeficientes estandarizados	t	Sig.
-----------	--------------------------------	-----------------------------	---	------

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

		B	Error típico	Beta		
1	Velocidad	(B) <b>-,035</b>	,008	-2,557	-4,184	,000
	Velocidad ** 2	(C) <b>6,637E-6</b>	,000	3,190	5,219	,000
	(Constante)	(A) <b>56,519</b>	13,556		4,169	,000
2	Velocidad	(B) <b>-,015</b>	,015	-,973	-1,030	,310
	Velocidad ** 2	(C) <b>4,076E-6</b>	,000	1,755	1,857	,071
	(Constante)	(A) <b>21,207</b>	25,159		,843	,404

Aplicando estos coeficientes a la expresión matemática dada, se obtienen las expresiones de los modelos de **Regresión Cuadrática** para cada situación - localización:

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2$$

**Situación- Localización 1 (L1):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 56,519 - 0,035 * \text{Velocidad} + 0,000006 * (\text{Velocidad})^2$$

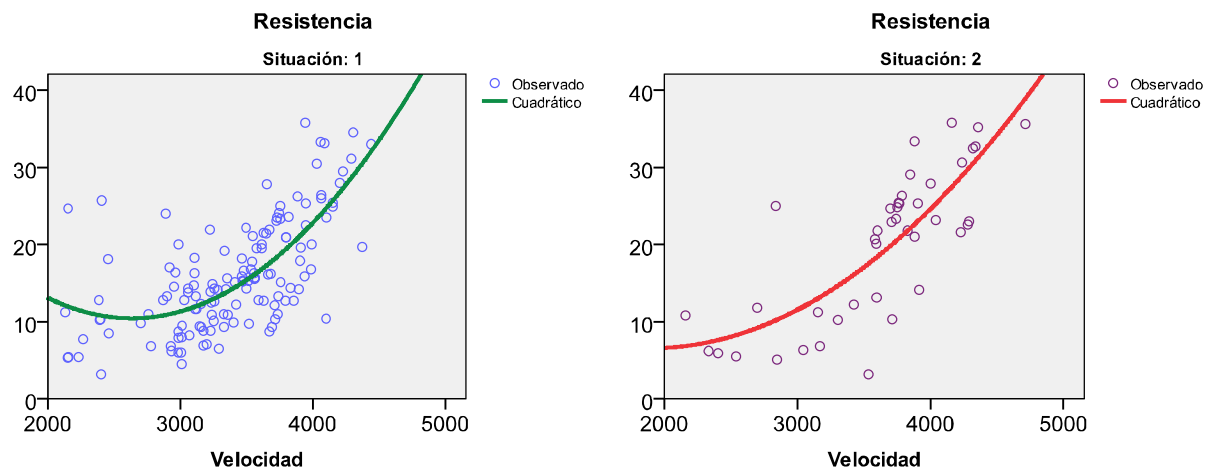
**Situación – Localización 2 (L2):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 21,207 - 0,015 * \text{Velocidad} + 0,000004076 * (\text{Velocidad})^2$$

El valor que se consigue para R, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente esperamos obtener, conociendo la velocidad de propagación de ultrasonidos de las piezas que se vayan a analizar.

Comprobando gráficamente estos resultados tenemos:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

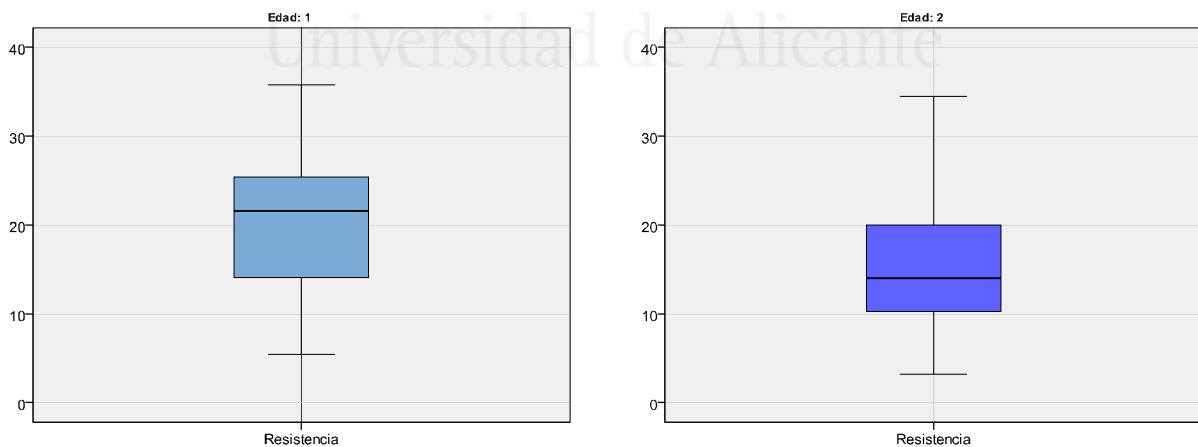


**Gráfico 5.18. Representación Gráfica de los modelos de Regresión Cuadrática, para Localización 1 y 2**

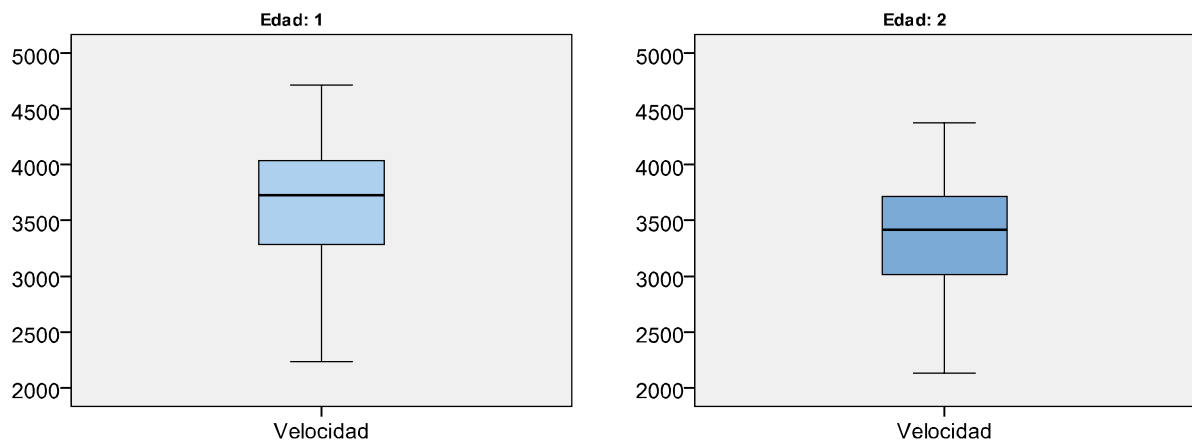
En estos gráficos se aprecia la nube de puntos (valores obtenidos, datos para cada situación) y la curva de regresión cuadrática obtenida, para cada uno de ellos.

**5.3.2.- Subpoblaciones definidas por su edad.**

Se procede ahora al análisis de Resistencia (R) y Velocidad (V), de las subpoblaciones definidas por la edad, utilizando el Gráfico de Caja y queda así:



**Gráfico 5.19. Diagrama de Caja para Resistencia por edad 1 y 2  
Véase la diferencia de percentiles y la línea de mediana**

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Gráfico 5.20. Diagramas de Caja para Velocidad en las submuestras definidas por la edad. Véase la diferencia de posición de percentiles y la línea de mediana**

Se aprecia claramente la diferencia de la posición de la mediana para las dos edades (E1 y E2), así como la posición de los dos cuartiles complementarios, para el total de la muestra.

**Análisis descriptivo.**

Los valores estadísticos descriptivos (para  $N = 62$  y  $N = 118$ ) datos con los que se está trabajando, separados por edad, se presentan en las dos siguientes tablas:

**Estadísticos Descriptivos según edad (E1 y E2).**

Tabla nº 5.6.

Edad 1 (E1)	Percentiles	Resistencia (R) N/mm <sup>2</sup>	Velocidad (V) m/seg
N		62	62
Media		20,58	3655,65
Desviación típica.		8,84	510,43
Asimetría		0,09	-0,46
Error típica de asimetría		0,30	0,30
Curtosis		-1,07	0,01
Error típica de curtosis		0,60	0,60
Rango		30,40	2481,00

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Percentiles	25	13,90	3275,75
Mediana	50	21,55	3729,00
	75	25,60	4044,75

Tabla nº 5.7.

Edad 2 (E2)	Percentiles	Resistencia (R) N/mm <sup>2</sup>	Velocidad (V) m/seg
N		118	118
Media		15,01	3328,71
Desviación Típica		6,67	534,47
Asimetría		0,45	-0,50
Error típico de asimetría		0,22	0,22
Curtosis		-0,43	-0,34
Error típico de curtosis		0,44	0,44
Rango		31,30	2243,00
Percentiles	25	10,28	3010,50
Mediana	50	14,00	3416,50
	75	20,00	3721,50

De los valores descriptivos expuestos, se pueden comentar los siguientes aspectos más significativos:

- La media obtenida, como valor central o promedio, para la resistencia de 20,58 N/mm<sup>2</sup> en edad 1 y de 15,01 N/mm<sup>2</sup> en edad 2. Respecto a los valores de Velocidad (V), tenemos la media en 3.656 y 3.329 m/seg. respectivamente.
- La desviación típica nos indica la escasa desviación de los datos respecto al valor medio para R (De casi 9 y 7 N/mm<sup>2</sup> respectivamente) y para V (de 510 y 534 m/seg. respectivamente).

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

- La asimetría negativa significa que el histograma se sale de la curva por la izquierda (más larga la cola). En la asimetría positiva, la cola de la derecha es más larga, obteniéndose valores que confirman una escasa asimetría.
- Respecto a la curtosis, cuando es igual a cero significa que la altura del histograma es igual al de la curva normal - Gauss. En este caso se acerca a cero.
- En cuanto al rango, se aprecia una amplia banda entre los valores extremos. (De 30 – 31 N/mm<sup>2</sup> en ambas edades y de 2.481 y 2.243 m/seg. en los mismos grupos de edad).
- En cuanto a los percentiles, se trata de los porcentajes de valores – datos, que se encuentran por debajo del valor percentil (25 %, 50 % y 75 %). En este caso el 50 % de los valores (mediana), están por debajo de 21,55 N/mm<sup>2</sup> y 14 N/mm<sup>2</sup>, de resistencia (R) para edad 1 y 2 y de 3.792 y 3.417 m/seg. de velocidad para esos grupos.

Este resultado confirma los valores de R y V más altos para los edificios más jóvenes (Edad 1) respecto a los más antiguos (Edad 2). Ya se han estudiado los distintos valores obtenidos, en las distintas edades (subgrupo de edad 1 y 2), de las estructuras de hormigón armado analizadas.

Ahora se plantean los modelos de regresión para los distintos grupos de sub poblaciones, (Edad 1 y 2), objeto de esta investigación, a través de distintos modelos de regresión, lineal y cuadrática.

### Modelos de Regresión Lineal (Para la subpoblación de edad)

Se plantea un modelo con una expresión matemática ya conocida, del tipo:

$$R = A + B * V$$

Calculando el modelo de regresión lineal se obtienen los siguientes parámetros:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Resumen del modelo**

Edad	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1	,824	,679	,673	5,056
2	,539	,291	,285	5,640

La variable independiente es Velocidad.

Analizamos el valor del R<sup>2</sup>. Vemos más fiable el modelo en Edad 1 (con un valor de 0,679), para edificios más jóvenes (Casi un 70% de poder estadístico)

**Aplicando el ANOVA**

Edad		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	3236,806	1	3236,806	126,635	,000
	Residual	1533,605	60	25,560		
	Total	4770,410	61			
2	Regresión	1514,213	1	1514,213	47,610	,000
	Residual	3689,319	116	31,804		
	Total	5203,532	117			

La variable independiente es la Velocidad.

Con estos resultados, se confirma que el modelo es aceptado (Con una significación de valor 0).

Se calcula ahora los coeficientes para el modelo planteado, de **regresión lineal**, obteniendo:

**Coeficientes**

Edad		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típico	Beta		
1	Velocidad	(B) ,014	,001	,824	11,253	,000
	(Constante)	(A) -31,588	4,680		-6,749	,000
2	Velocidad	(B) ,007	,001	,539	6,900	,000
	(Constante)	(A) -7,397	3,288		-2,249	,026

Aplicando estos coeficientes en el modelo de Regresión Lineal planteado inicialmente, para las dos subpoblaciones de edad, se obtiene:

$$R = A + B * V$$



**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS****Edad 1 (E1):**Resistencia media estimada =  $-31,588 + 0,014 * \text{Velocidad}$ **Edad 2 (E2):**Resistencia media estimada =  $-7,397 + 0,007 * \text{Velocidad}$ 

El valor que se consigue para R, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente esperamos obtener, conociendo la velocidad de propagación de ultrasonidos de las piezas que se vayan a analizar. La pendiente de la recta (coeficiente B), en el gráfico de regresión lineal es de 0,014, por tanto mayor que 0,007, lo que diferencia las dos edades estudiadas. Se expone ahora este resultado, de forma gráfica:

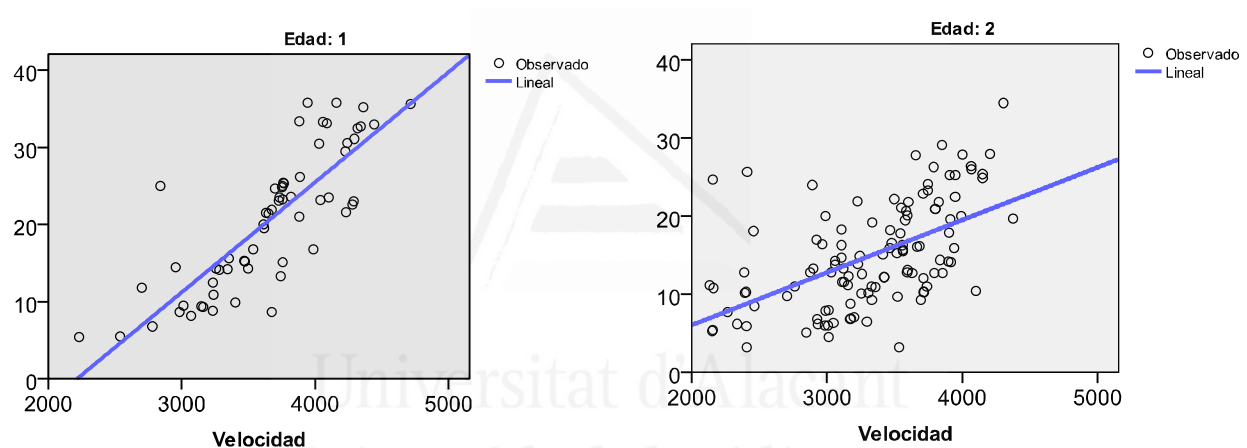


Gráfico 5.21 Representaciones Gráficas de resistencia y velocidad por edad. Véanse las distintas pendientes de la recta.

En estos dos gráficos se observa la nube de puntos (valores observados, datos para cada uno de los dos grupos de edad) y la recta de regresión obtenida. Véase una mayor pendiente para la edad 1 (Para edificios más jóvenes).

**Para el Modelo de Regresión Cuadrática (Para Subpoblación de Edad).**

En este caso, se plantea un modelo de regresión, con la siguiente expresión matemática:

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2$$

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Calculando el modelo de Regresión Cuadrática, se obtienen los siguientes parámetros:

**Resumen del modelo**

Edad	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1	,833	,693	,683	4,980
2	,608	,370	,359	5,340

La variable independiente es Velocidad.

Se comprueba que en los edificios más jóvenes (Edad 1), el modelo mejora ( $R^2 = 0,693$ ), respecto a las estructuras más antiguas (Edad 2), con una significancia mucho más baja ( $R^2 = 0,370$ )

**Aplicación ANOVA**

Edad		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	3307,047	2	1653,523	66,667	,000
	Residual	1463,364	59	24,803		
	Total	4770,410	61			
2	Regresión	1923,672	2	961,836	33,724	,000
	Residual	3279,859	115	28,521		
	Total	5203,532	117			

La variable independiente es la Velocidad.

Con estos resultados se confirma también que el modelo es aceptado, con una significación de valor 0.

Se calcula ahora los coeficientes de correlación para los modelos de Regresión Cuadrática, obteniendo:

**Coefficientes**

Edad		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típico	Beta		
1	Velocidad	<b>(B) -,008</b>	,013	-,473	-,611	,543

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

	Velocidad ** 2	(C) <b>3,172E-6</b>	,000	1,303	1,683	,098
	(Constante)	(A) <b>7,350</b>	23,593		,312	,757
2	Velocidad	(B) <b>-,029</b>	,009	-2,328	-3,062	,003
	Velocidad ** 2	(C) <b>5,595E-6</b>	,000	2,882	3,789	,000
	(Constante)	(B) <b>48,138</b>	14,984		3,213	,002

Aplicando estos coeficientes se obtienen las expresiones de los modelos de **Regresión Cuadrática**, para cada edad, según la siguiente expresión:

$$\text{Resistencia} = A + B \cdot \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2$$

Se obtiene que:

**Edad 1 (E1):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 7,350 - 0,008 * \text{Velocidad} + 0,000003172 * (\text{Velocidad})^2$$

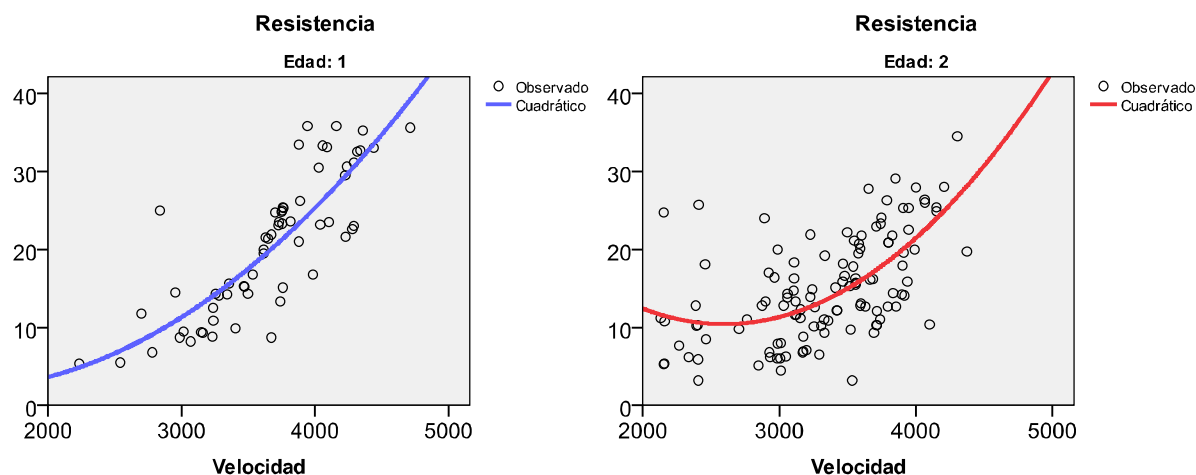
**Edad 2 (E2):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 48,138 - 0,029 * \text{Velocidad} + 0,000005595 * (\text{Velocidad})^2$$

El valor que se consigue para R, como ya se ha indicado con anterioridad, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente esperamos obtener, conociendo la velocidad de propagación de ultrasonidos de las piezas que se vayan a analizar.

Y si se procede a su representación gráfica, se observa:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**



**Gráfico 5.22 Representaciones Gráficas de resistencia y velocidad por edad**

En estos dos gráficos se aprecia la nube de puntos (valores observados, datos para cada edad) y las curvas de regresión cuadrática obtenidas, para cada subpoblación.

**5.4.- Análisis estadístico según tipología de edificios.**

Ya se han analizado los datos globales, los datos por localización y los datos por edad del edificio, de forma independiente.

Se procede ahora al análisis de los datos de forma más concreta, para cada uno de los cuatro tipos de edificios anteriormente definidos, combinando la situación y la edad del edificio, simultáneamente, para estructuras tipo A (L1, E1), B (L1, E2), C(L2, E1) y D (L2, E2). Dada la mayor fiabilidad en modelos de Regresión Cuadrática, como se ha visto en anteriores apartados, se desarrollan a continuación, según la ya conocida expresión.

$$\text{Resistencia} = A + B * \text{Velocidad} + C * (\text{Velocidad})^2$$

**EDIFICIOS Tipo “A”: Situación = 1; Edad=1 (L1, E1)**

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,873	,762	,750	4,155

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

La variable independiente es Velocidad.

El alto valor estadístico de  $R^2$ , del 76,2 % confirma la aceptación de este modelo en este tipo de edificios.

**Aplicación ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	2206,799	2	1103,399	63,898	,000
Residual	690,726	40	17,268		
Total	2897,524	42			

La variable independiente es Velocidad.

Con este valor de significancia de 0,00, se confirma que el modelo es aceptado y se procede ahora al cálculo de los coeficientes para este modelo de **Regresión Cuadrática** y se obtiene:

**Coeficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Velocidad	(B) ,022	,015	-1,187	-1,465	,151
Velocidad ** 2	(C) 5,57E-006	,000	2,047	2,526	,016
(Constante)	(A) 26,622	26,447		1,007	,320

Aplicando estos coeficientes a la expresión matemática dada, se obtiene la expresión:

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

El valor que se obtiene para R, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente se espera obtener, conociendo la velocidad de ultrasonidos de las piezas a analizar.

Comprobando gráficamente estos resultados se tiene:

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

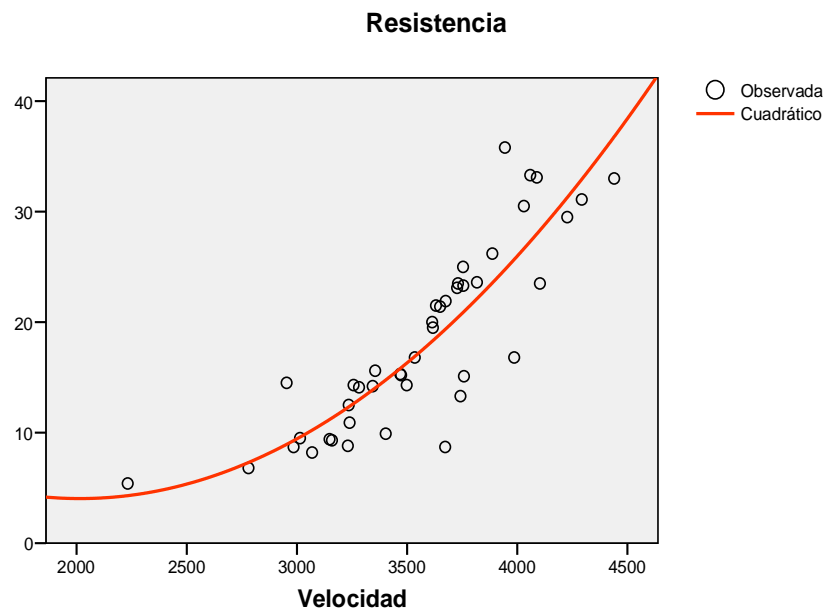


Gráfico 5.23: Curva de correlación V y R para Edificios del tipo "A".

**EDIFICIOS Tipo "B": Situación = 1; Edad = 2**

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,573	,329	,314	5,190

La variable independiente es Velocidad.

El bajo valor estadístico de  $R^2$ , del 32,9 % indica que este modelo tiene, por tanto, menor fiabilidad.

**Aplicación ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1213,299	2	606,650	22,520	,000
Residual	2478,282	92	26,938		
Total	3691,581	94			

La variable independiente es Velocidad.

Con este valor de significancia de 0,00, se confirma que el modelo es aceptado procediéndose ahora al cálculo de los coeficientes para este modelo de **Regresión Cuadrática**, obteniendo:

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Coefficientes**

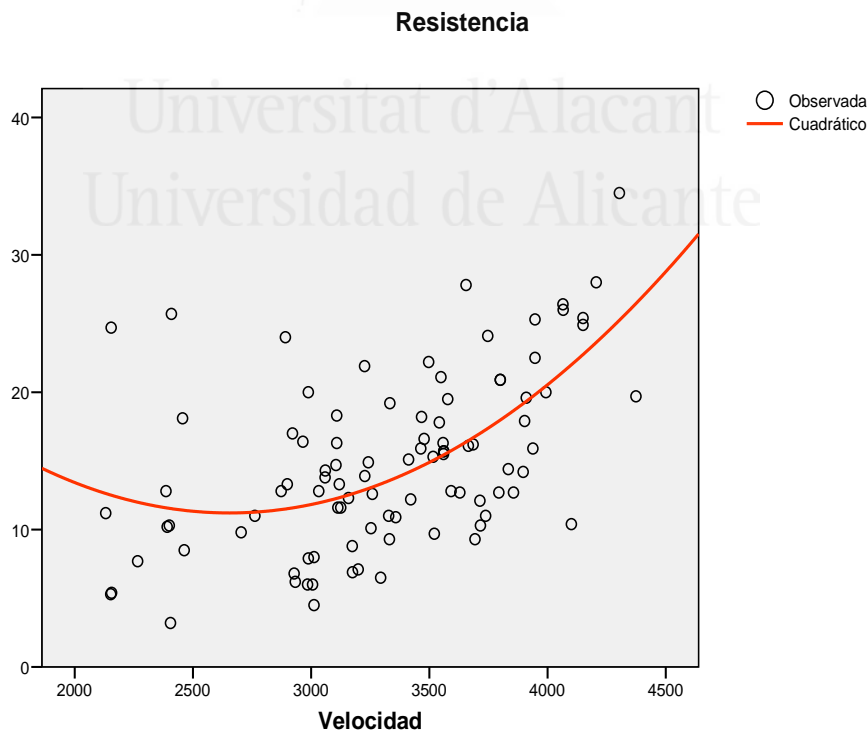
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Velocidad	(B) <b>-,027</b>	,010	-2,349	-2,749	,007
Velocidad ** 2	(C) <b>5,16E-006</b>	,000	2,860	3,347	,001
(Constante)	(A) <b>47,568</b>	15,845		3,002	,003

Aplicando coeficientes a la expresión matemática dada, se obtiene la expresión:

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

El valor que se obtiene para R, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente se espera obtener, conociendo la velocidad de ultrasonidos de las piezas a analizar.

Comprobando gráficamente estos resultados se observa:



**Gráfico 5.24: Gráfico de Correlación V y R para Edificios del tipo "B".**

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**EDIFICIOS Tipo “C”: Situación = 2; Edad = 1 (L2, E1)**

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,757	,574	,520	5,498

La variable independiente es Velocidad.

El alto valor estadístico de R<sup>2</sup>, del 57,4 % confirma la aceptación de este modelo, en este tipo de edificios.

**Aplicación ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	650,847	2	325,424	10,764	,001
Residual	483,709	16	30,232		
Total	1134,557	18			

La variable independiente es Velocidad.

Con este valor de significancia de 0,01, se confirma que el modelo es aceptado, por lo que se procede ahora al cálculo de los coeficientes para este modelo de **Regresión Cuadrática**, obteniendo:

**Coefficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t		Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico	
Velocidad	(B) ,023	,026	1,686	,867		,399
Velocidad ** 2	(C) -1,75E-006	,000	-,936	-,481		,637
(Constante)	(A) -34,709	45,273		-,767		,454

Aplicando estos coeficientes a la expresión matemática dada, se obtiene la expresión:

<b>Edificio “C”:</b> Resistencia = -34,709 + 0,023 * Velocidad - 0,00000175 * Velocidad <sup>2</sup>
--

El valor que se obtiene para R, no es una resistencia real, sino una resistencia media estimada, que finalmente se espera obtener, conociendo la velocidad de ultrasonidos de las piezas a analizar.



**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Comprobando gráficamente estos resultados se observa:

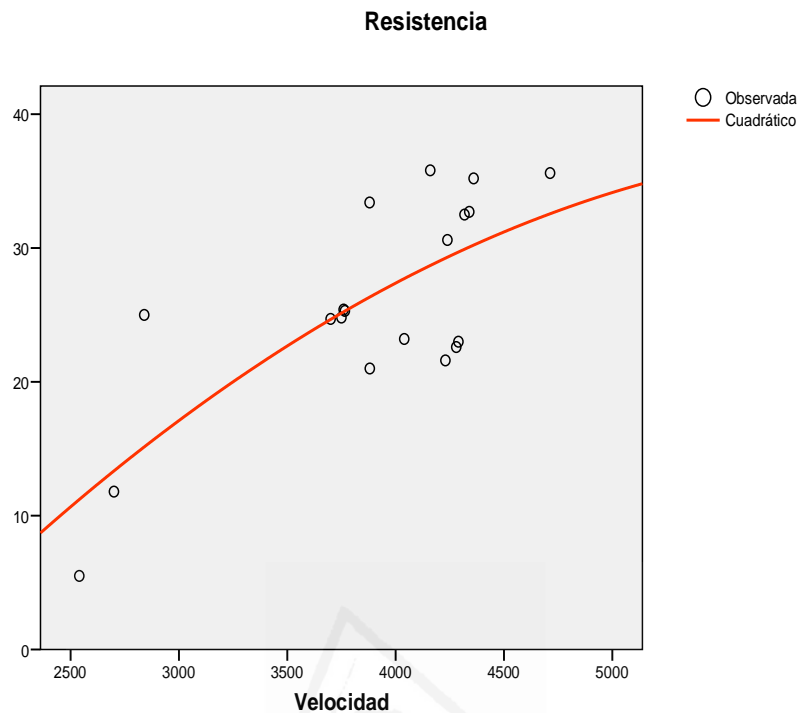


Gráfico 5.25. Curva de correlación de V y R para Edificios tipo “C”.

**EDIFICIOS Tipo “D”: Situación = 2; Edad = 2 (L2, E2)**

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
,811	,658	,623	5,080

La variable independiente es Velocidad.

El alto valor estadístico de  $R^2$ , del 65,8 % confirma la aceptación de este modelo en este tipo de edificios.

**Aplicación ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	990,968	2	495,484	19,197	,000
Residual	516,205	20	25,810		
Total	1507,173	22			

La variable independiente es Velocidad.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Con este valor de significancia de 0,00, se confirma que el modelo es aceptado y se procede ahora al cálculo de los coeficientes para este modelo de **Regresión Cuadrática**, teniendo:

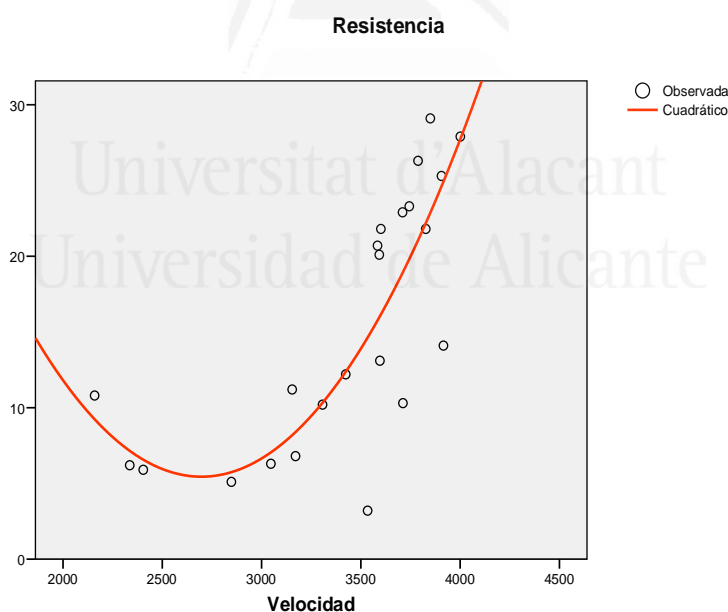
**Coeficientes**

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Velocidad	<b>-,071</b>	,026	-4,503	-2,749	,012
Velocidad ** 2	<b>1,31E-005</b>	,000	5,216	3,184	,005
(Constante)	<b>100,787</b>	39,124		2,576	,018

Aplicando coeficientes a la expresión matemática dada, se obtiene la expresión:

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

Comprobando gráficamente los resultados se obtiene:



**Gráfico 5.26. Curva de correlación V y R para Edificios tipo "D".**

Se aprecian las cuatro curvas distintas, con distinta tendencia, para cada uno de los distintos tipos de edificios estudiados.

## **5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

---

### **5.5.- Análisis de las bandas de confianza.**

De cara a mejorar los resultados obtenidos hasta el momento, en este proceso de investigación y a conseguir Modelos de Regresión de gran fiabilidad (además de las propias curvas - rectas de regresión) se procede a la creación de las denominadas “bandas de confianza”, de las que ya se hablaba en el apartado de Metodología. Una “banda de confianza” es equivalente a la una sucesión de “intervalos de confianza” para cada valor de Resistencia (R) y de Velocidad (V).

El concepto de “intervalo de confianza” ya conocido, se basa en qué “confianza” se asocia a la “probabilidad”, sabiendo que la media de la población es desconocida, por eso se quiere estimar (calcular un valor aproximado), pero nunca se sabe si ese valor se acerca o no al valor verdadero, que tampoco se conoce. Entonces se hablará en términos de probabilidad.

Para eso se estima una franja de valores, donde está, donde se encuentra, el valor medio, con una probabilidad dada. Las “bandas de confianza” se construyen con el intervalo de confianza, utilizando los valores de la desviación típica, según distintas fórmulas matemáticas.

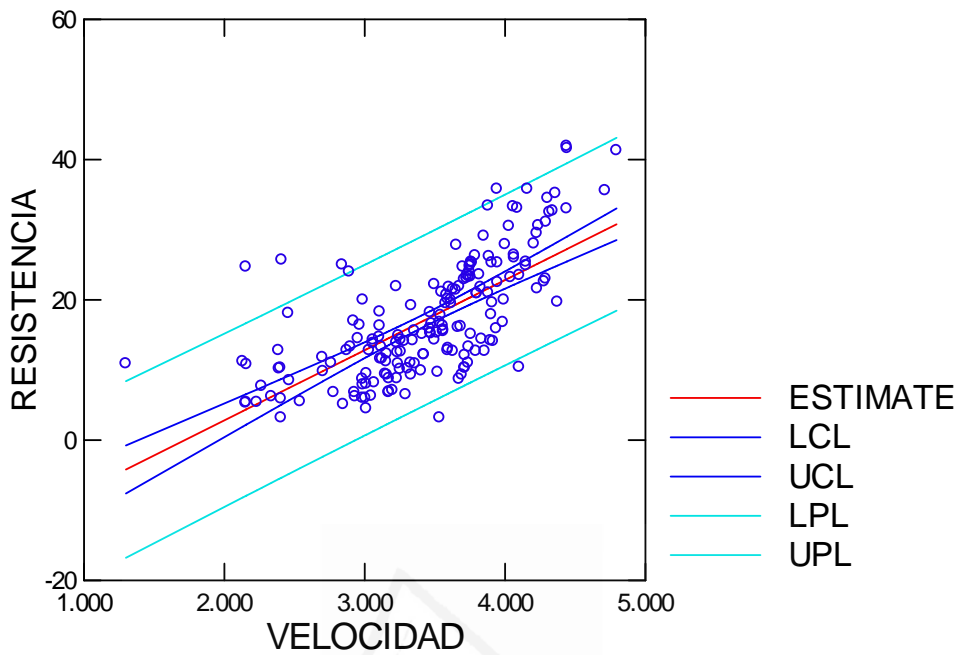
Según ello y de forma gráfica se obtienen los siguientes diagramas de bandas (rectas y curvas de regresión) para los valores globales, en las distintas subpoblaciones analizadas (Muestra global, localización 1 y 2, edad 1 y 2) y para cada una de las tipologías estructurales estudiadas (Edificios tipo A, B, C y D).

#### **5.5.1.- Para los datos globales (180 valores).**

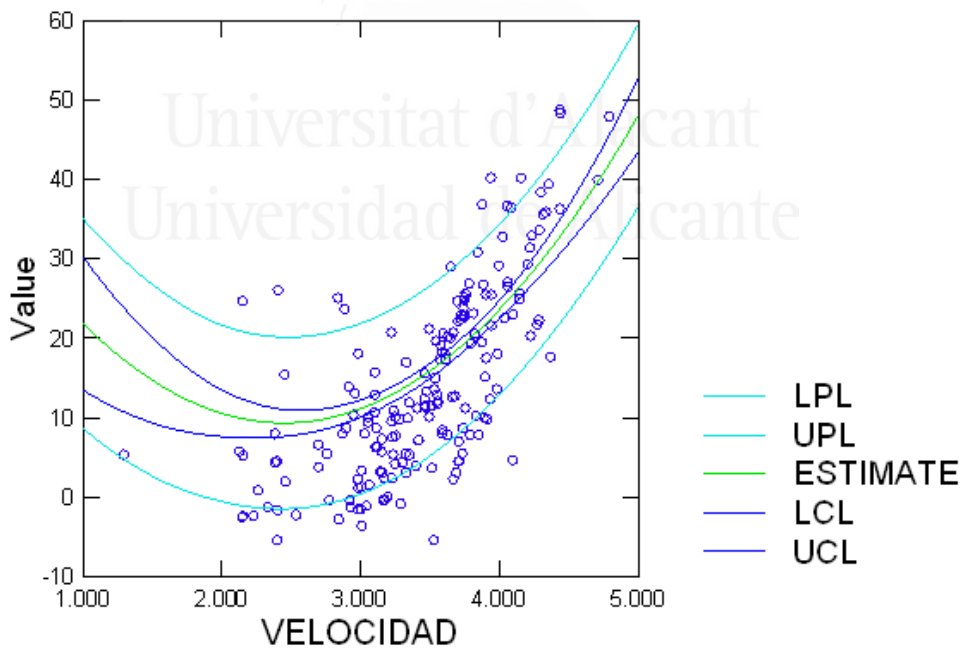
En los dos gráficos siguientes se presentan las rectas - curvas de regresión (lineal y cuadrática respectivamente) y las dos bandas de confianza para cada subpoblación.

5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Confidence Interval and Prediction Interval



Confidence and Prediction Intervals



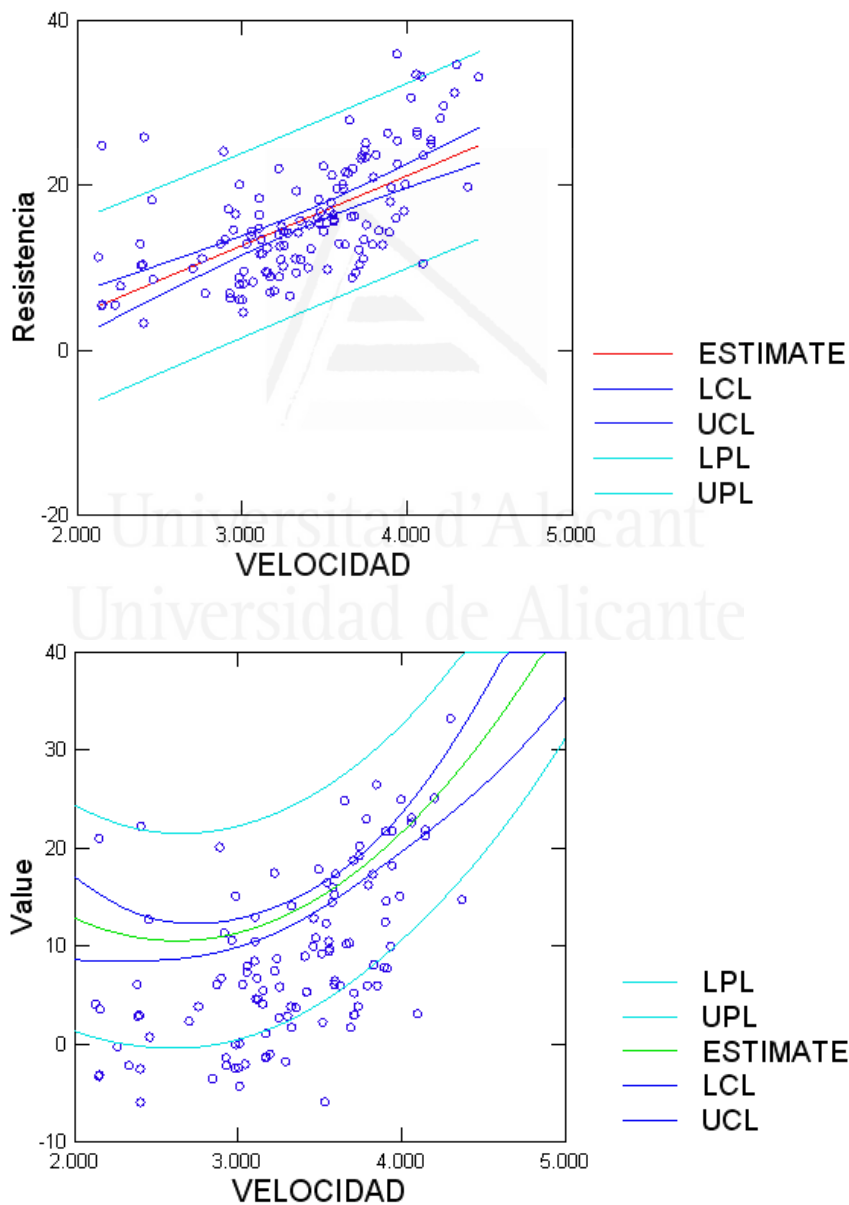
En los Anejos, al final del documento se presenta el gráfico final de Regresión Cuadrática (muy fiable), a mayor tamaño y mejorando su presentación para facilitar su interpretación.

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**5.5.2.- Para los datos por localización del edificio. (L1 y L2)**

En los dos gráficos siguientes se presentan las rectas - curvas de regresión (lineal y cuadrática respectivamente) y las dos bandas de confianza para cada subpoblación. (Banda estrecha y banda ancha)

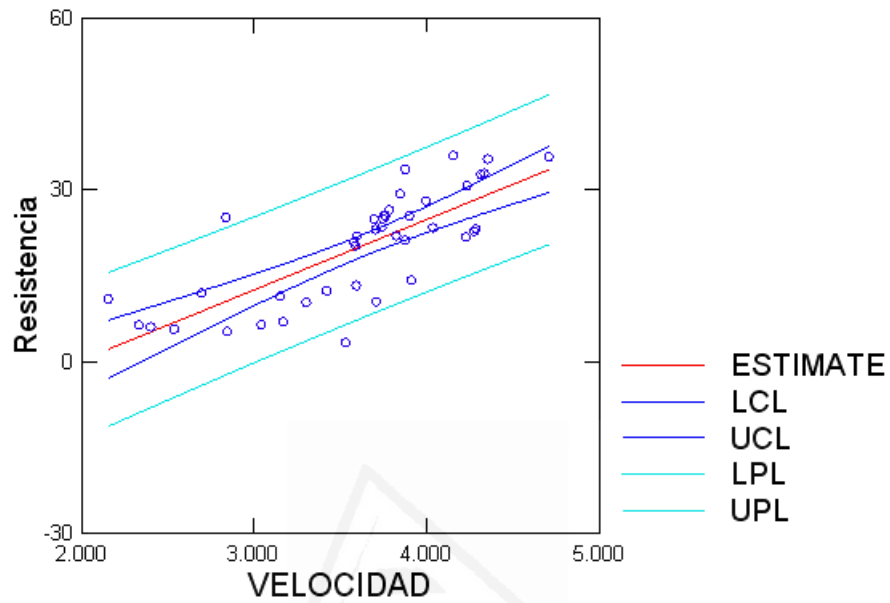
**Para bandas de Localización 1 (L1).**



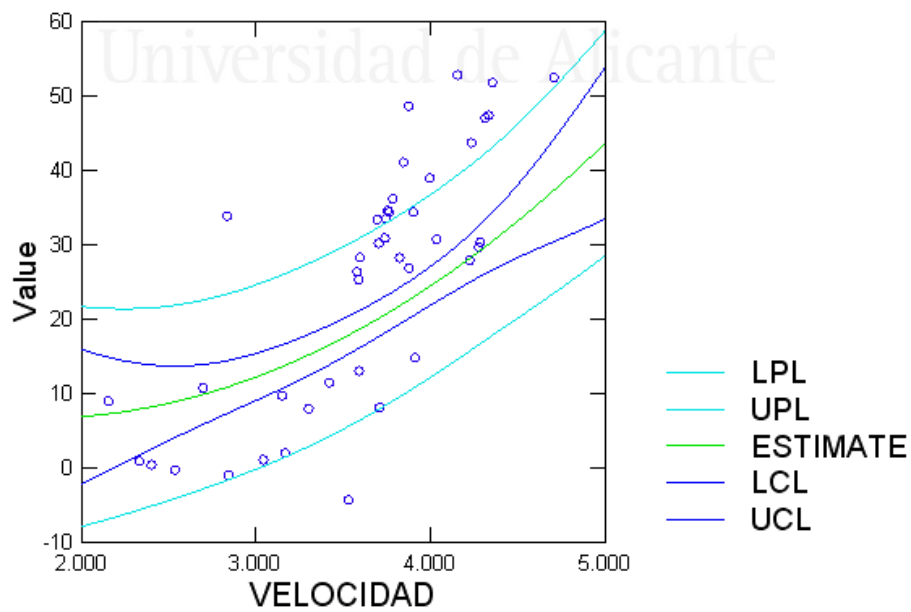
**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**Para bandas de Localización 2 (L2).**

**Confidence Interval and Prediction Interval**



**Confidence and Prediction Intervals**



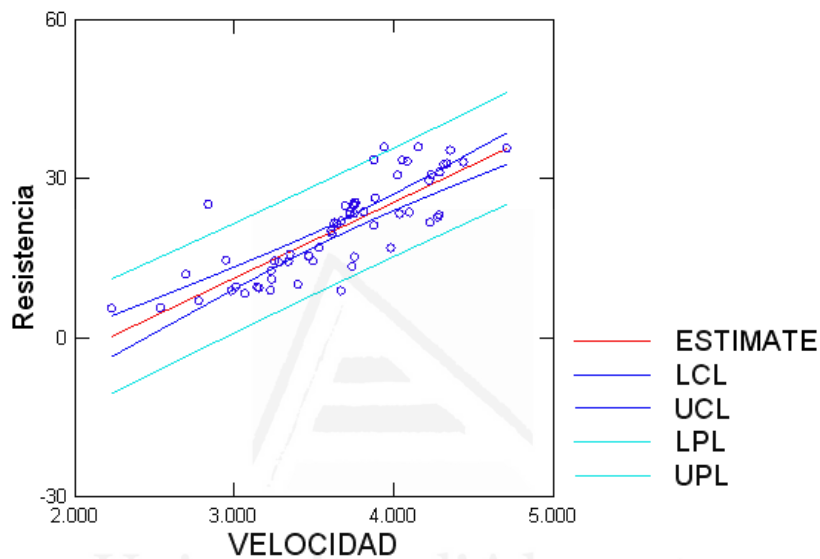
**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**5.5.3.- Para los datos por edad del edificio. (E1 y E2).**

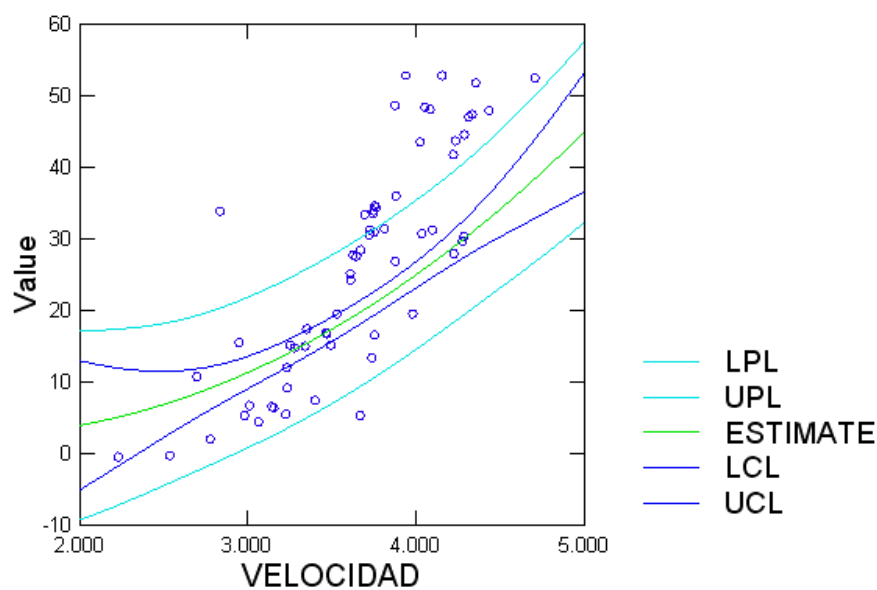
En los dos gráficos siguientes se presentan las rectas - curvas de regresión (lineal y cuadrática) y las dos bandas de confianza para cada subpoblación.

**Para las bandas de Edad 1. (E1).**

Confidence Interval and Prediction Interval



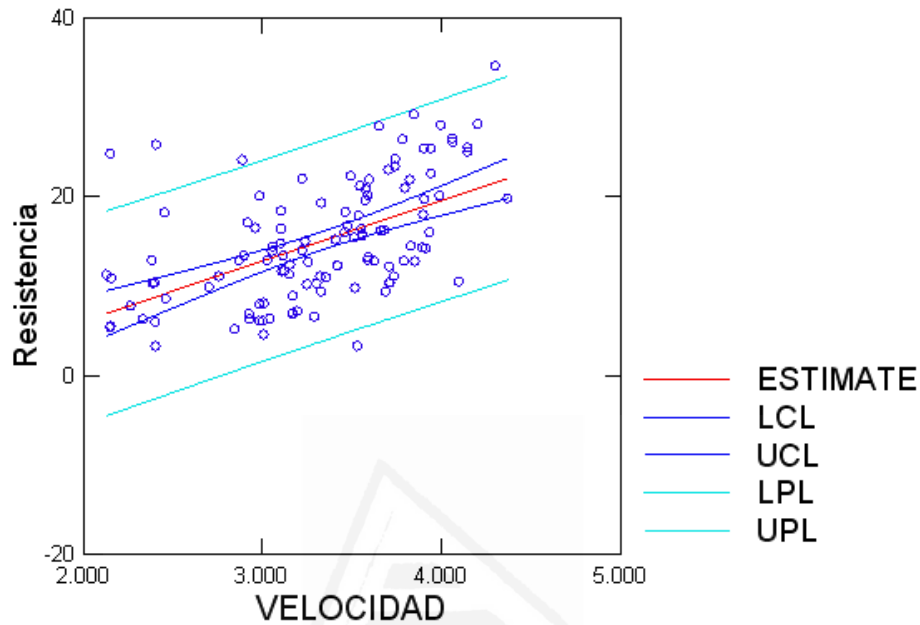
Confidence and Prediction Intervals



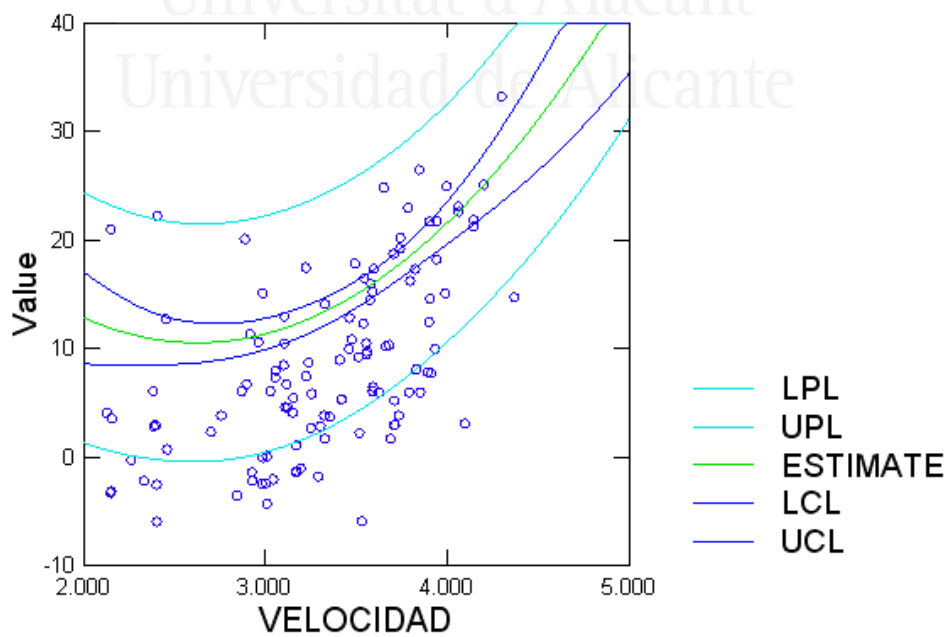
5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para bandas de Edad 2. (E2).

Confidence Interval and Prediction Interval



Confidence and Prediction Intervals





## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

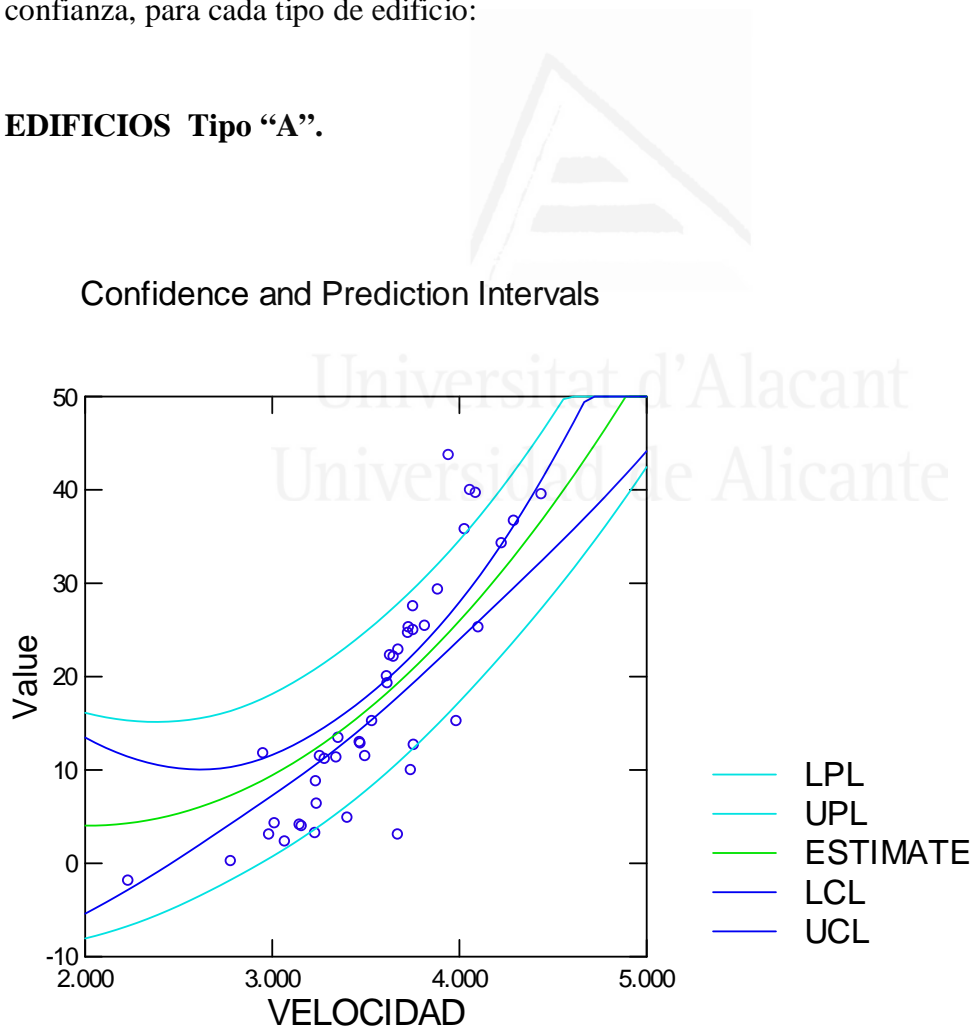
De todas estas gráficas se confirma que las curvas - rectas de regresión, coinciden con las obtenidas y presentadas con anterioridad y responden a la expresión matemática del modelo propuesto, para cada una de las subpoblaciones estudiadas.

Además, como complemento de información, se han añadido las correspondientes “bandas de confianza” donde se encontrarán, con un mayor nivel de fiabilidad, los valores buscados, más cercanos al desconocido valor real de la resistencia del hormigón de la pieza chequeada.

### 5.5.4.- Para los datos por tipos de edificios. (Edificios A, B, C y D)

En las cuatro gráficas siguientes se presentan las curvas de regresión cuadrática y dos bandas de confianza, para cada tipo de edificio:

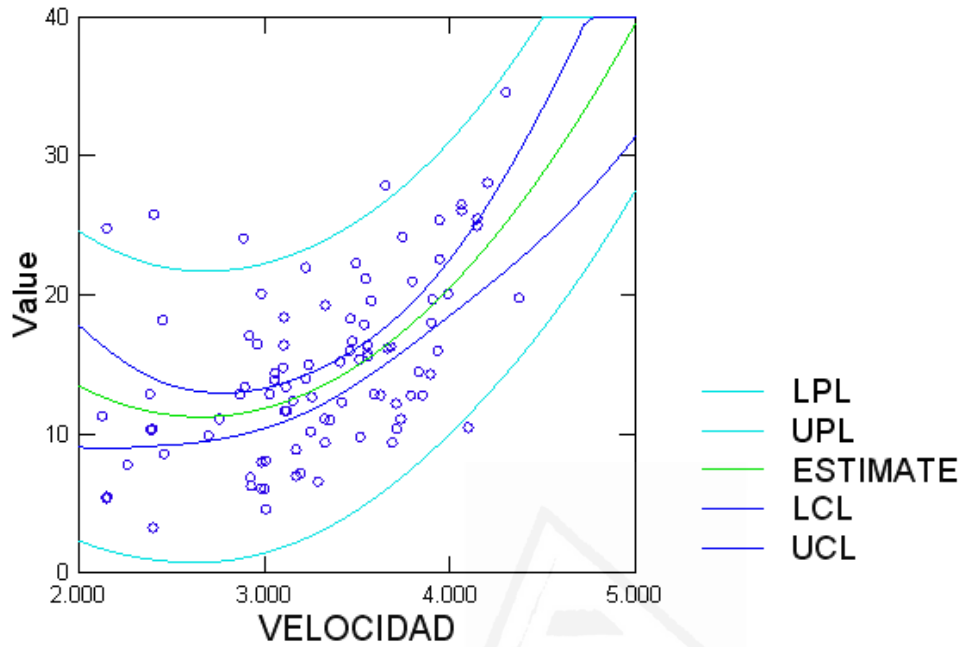
#### EDIFICIOS Tipo “A”.



5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

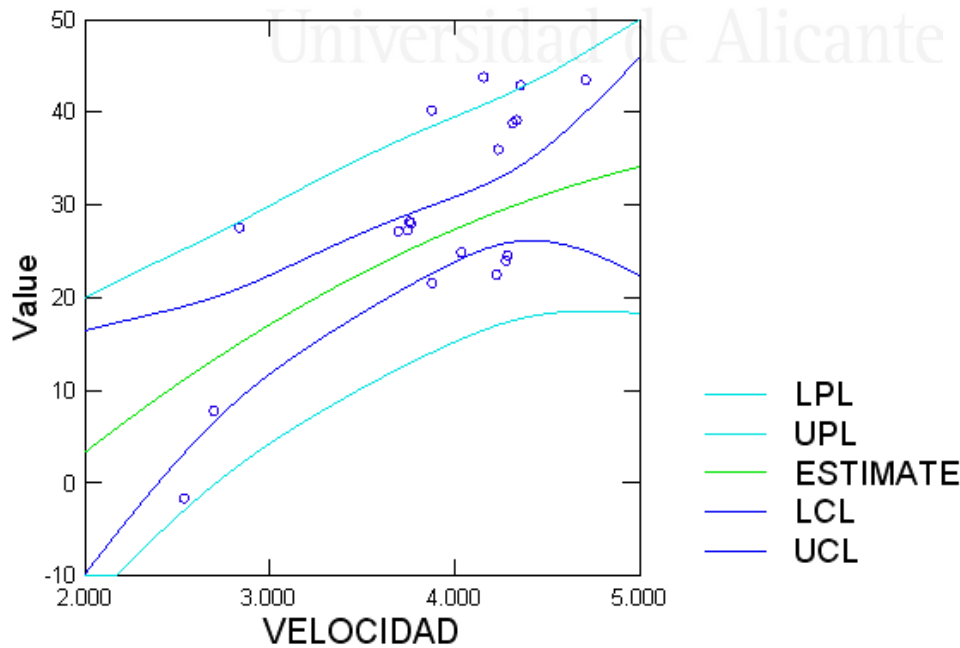
**EDIFICIOS Tipo “B”.**

Confidence and Prediction Intervals



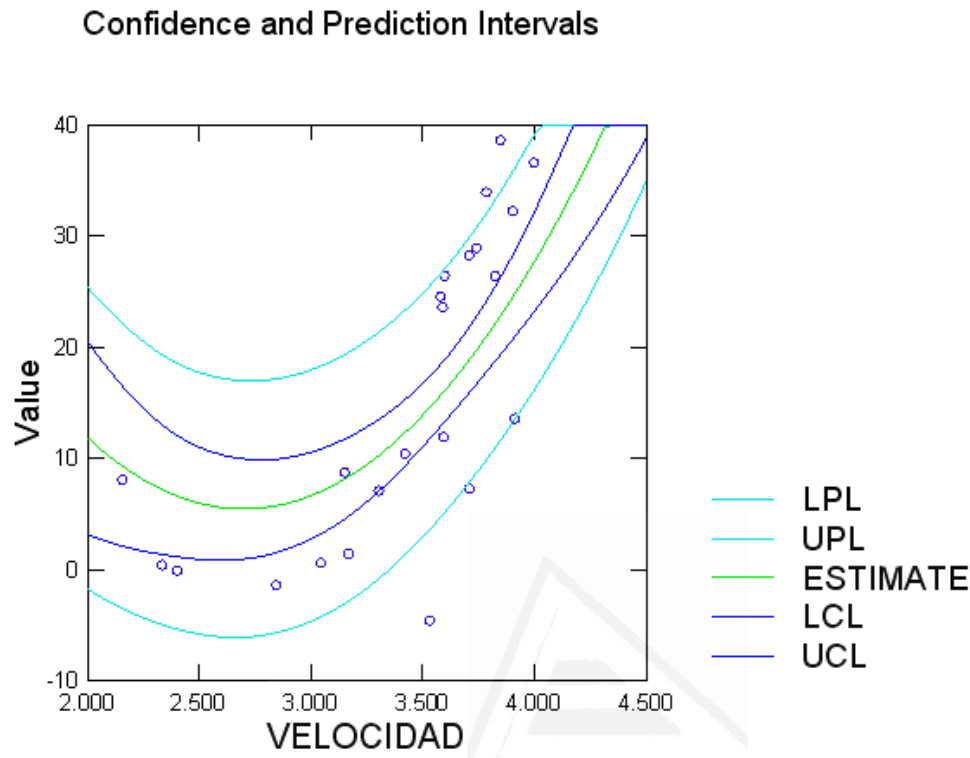
**EDIFICIOS Tipo “C”.**

Confidence and Prediction Intervals



**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

**EDIFICIOS Tipo “D”.**



De esta forma se aprecia gráficamente el desarrollo de la curva de regresión y las “bandas de confianza” donde se encuentran los valores esperados de resistencia, en función de la velocidad.

Trabajando todos estos datos, tras un minucioso tratamiento estadístico y aplicando las fórmulas de Regresión Cuadrática dadas, se obtienen los siguientes valores de Resistencia Media Esperada (R), en función de la Velocidad Ultrasonica (V), para todos los edificios chequeados y para cada tipo de estructura analizada:

Tabla nº: 5. 8.

<b>OBTENCIÓN DE RESISTENCIAS MEDIAS (Valor esperado N/mm<sup>2</sup>)</b>						
<b>FÓRMULAS DE REGRESIÓN CUADRÁTICA</b>						
Velocidad	2000	2500	3000	3500	4000	4500
Todas las estructuras	12	10	11	16	23	34
Edad E1 (N/mm <sup>2</sup> )	4	7	12	18	26	36

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Edad E2 (N/mm <sup>2</sup> )	13	11	11	15	22	31
Localización L1 (N/mm <sup>2</sup> )	11	7	6	8	13	21
Localización L2 (N/mm <sup>2</sup> )	8	9	13	19	26	36
Estructura tipo A (L1 y E1)	5	6	11	18	28	40
Estructura tipo B (L1 y E2)	15	13	14	17	23	32
Estructura tipo C (L2 y E1)	4	12	19	24	29	33
Estructura tipo D (L2 y E2)	11	5	6	13	26	47

Para la generación de esta tabla se ha confeccionado una Hoja de Cálculo, lo que permite acceder a ella con cualquier velocidad de ultrasonidos y obtener así un valor de resistencia (R) más ajustado a la realidad, para cada estructura chequeada.

**5.6.- Discusión de los resultados.**

En este apartado se procede a plantear, analizar y discutir, los resultados obtenidos hasta el momento, destacando:

1.- Del tratamiento estadístico llevado a cabo, se obtienen distintos “valores descriptivos” para la muestra total final seleccionada (180 Probetas Testigo), que se presentan de forma resumida en la siguiente tabla:

Tabla nº 5. 9.

VALORES DESCRIPTIVOS							
Muestra (Subpoblaciones) Variables medidas (R y V)	Nº de valores	Media		Mediana (Cuartil 2)		Desviación típica	
		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

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

---

Estos resultados son “reales” solo para las piezas analizadas, no extrapolables al resto de la población no analizada. Para eso, se proponen los modelos de correlación R - V más adecuados, para cada una de las subpoblaciones estudiadas y que se discuten más adelante.

2.- Estos valores analizados para los 180 elementos estudiados - seleccionados, se obtienen tras la eliminación de los distintos valores “outlier” ya expuestos con anterioridad. De esta forma no se afecta la muestra original de los datos disponibles, consiguiéndose una gran fiabilidad en el resultado a discutir (MURPHY THOMAS, 2008).

3.- En el análisis exploratorio se obtiene, como se aprecia en la tabla resumen anterior (tabla 5.9), una serie de valores para resistencia (R) y para velocidad (V), de los que 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  $175 \text{ Kp/cm}^2$  ( $17,5 \text{ N/mm}^2$ ) 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).

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

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 fatiga del hormigón con el paso del tiempo, respectivamente.

4.- Por otra parte, tanto en los valores de Resistencia (R) como los de Velocidad (V), se cumple la hipótesis de normalidad, dado que el “p-valor” (0,125 para R y 0,296 para V) es superior a 0,05, por lo que se acepta la hipótesis nula de normalidad de la variable, lo que significa que las diferencias entre las frecuencias observadas en los datos y las teóricas, bajo el supuesto de normalidad, son pequeñas, pudiendo ser debidas a la aleatoriedad de la muestra. Se considera por tanto, una muestra que responde a un perfil de normalidad en la Curva de Gauss. (GUSTAV HEMPEL, C. 1988)

5.- Se obtienen correlaciones (r) entre los valores de Resistencia (R) y de Velocidad (V), que se identifican en el siguiente cuadro:

Tabla nº 5.10: 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).

## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

---

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”).

6.- Analizando los datos de que se dispone, expuestos en capítulos anteriores y aplicando la Técnica ANOVA (Análisis 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)
- En concreto 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/mm<sup>2</sup>, mientras que en los de mayor edad es de 3.329 m/seg y de 15,96 N/mm<sup>2</sup>.
- 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”).

7.- Una vez confeccionadas las curvas y rectas de regresión y sus correspondientes expresiones

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

matemáticas (Regresión cuadrática y regresión lineal, respectivamente), se obtienen cinco modelos distintos, uno para cada sub-población, con el poder explicativo de cada modelo, que se presenta en la siguiente tabla resumen (tabla nº5.11):

Tabla nº 5. 11: Poder explicativo

MUESTRA (SUBPOBLACIÓN)	MODELO DE REGRESIÓN	PODER EXPLICATIVO ( $R^2$ )
Global (Todas las estructuras)	Lineal	0,459
	Cuadrático	0,548
Localización 1 (L1)	Lineal	0,380
	Cuadrático	0,484
Localización 2 (L2)	Lineal	0,597
	Cuadrático	0,630
Edad 1 (E1)	Lineal	0,679
	Cuadrático	0,693
Edad 2 (E2)	Lineal	0,291
	Cuadrático	0,370

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)

8.- Para finalizar este apartado, 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



## 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

---

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 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%). ( $R^2 = 0,693$  y  $R^2 = 0,630$ , respectivamente). Este es el caso de los ya referidos edificios tipo “C”.

9.- En cuanto a otras consideraciones y con carácter de discusión, se debe recordar que para reparar una estructura de hormigón armado, utilizando materiales especiales del tipo resina epoxi o similares, es necesario que el elemento dañado presente una resistencia del hormigón mayor de  $10 \text{ N/mm}^2$ , para garantizar la adecuada adherencia al soporte (BRESSION, J 1971). Analizados los datos estadísticos de esta investigación, es en el percentil 25 donde se encuentra el valor de resistencia de  $10,83 \text{ N/mm}^2$ . Esto indica que el 25% de los valores de la muestra estudiada, están por debajo de esa resistencia, por lo que se aporta el dato de que el 25% de los pilares chequeados, no podrían ser reparados utilizando estos productos especiales, por lo que se deberían plantear otros sistemas de reparación alternativos, basados en refuerzos con elementos metálicos u otros materiales sin adherir al soporte.

10.- Como discusión de resultados, teniendo en cuenta lo dicho 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 de valores tipo de correlación de resultados para la “clasificación de la calidad del hormigón” (tabla ya presentada en el capítulo de Estado del Arte), en función de los valores de Velocidad de Propagación de Ultrasonidos (como se ve,

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

no se contemplan valores de resistencia a compresión) lo que introduce un claro factor de “subjetividad” inadecuado a este tipo de trabajos de investigación.

Tabla nº: 5.12: Tabla de clasificación de Calidad del Hormigón

<b>VELOCIDAD PROPAGACIÓN (m/seg)</b>	<b>CALIDAD DEL HORMIGÓN</b>
> 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 esta Tesis Doctoral, 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 nº 5. 13.

<b>PROPUESTA DE CLASIFICACION CALIDAD DEL HORMIGON</b>					
<b>TABLA DE CORRELACION DE RESULTADOS (Con Velocidad y Resistencia)</b>					
<b>VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/seg)</b>	<b>CALIDAD DEL HORMIGON (**)</b>	<b>RESISTENCIAS MEDIAS (N/mm<sup>2</sup>) (Valor esperado)</b>			
		<b>Localización</b>		<b>Edad</b>	
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
> 4.500	EXCELENTE	> 21	> 36	> 36	> 31
4.000 – 4.500	MUY BUENO	13 - 21	26 - 36	26 - 36	22 - 31
3.500 – 4.000	BUENO	8 - 13	19 - 26	18 - 26	15 - 22
3.000 – 3.500	ACEPTABLE	6 - 8	13 - 19	12 - 18	11 - 15
2.500 – 3.000	DUDOSO	(*)	9 - 13	7 - 12	(*)

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

2.000 – 2.500	DEFICIENTE	(*)	8 - 9	4 - 7	(*)
< 2.000	MUY DEFICIENTE	(*)	< 8	< 4	(*)
(*) Valores no congruentes obtenidos de la fórmula de Regresión Cuadrática.					
(**) Denominación de la Calidad del Hormigón, en distinta escala, para cada tipología de estructura (L1, L2, E1, E2, A, B, C o D).					

(Aportación del doctorando)

Se confirma que las correlaciones “más certeras” son las correspondientes a las estructuras localizadas a más de 500 metros de la costa (L2) y las más jóvenes, con menos de 20 años de edad (E1) y además con valores muy parecidos. Es el caso de los citados edificios del tipo “C”.

Avanzando un poco más en la investigación, se aporta una nueva tabla (tabla 5.14), también como futura propuesta normativa, para el análisis de tipología de obras, combinadas, según la siguiente distribución ya conocida:

Tipo de estructura “A”:

Menos de 500 m de la costa (L1) y menos de 20 años de edad (L1).

Tipo de estructura “B”:

Menos de 500 m de la costa (L1) y más de 20 años de edad (L2).

Tipo de estructura “C”:

Más de 500 m de la costa (L2) y menos de 20 años de edad (E1).

Tipo de estructura “D”:

Más de 500 m de la costa (L2) y más de 20 años de edad (E2).

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

Tabla nº 5.14.

<b>PROPUESTA DE CLASIFICACION CALIDAD DEL HORMIGON</b>					
<b>TABLA DE CORRELACION DE RESULTADOS (Con Velocidad y Resistencia)</b>					
<b>VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/seg)</b>	<b>CALIDAD DEL HORMIGON (**)</b>	<b>RESISTENCIAS MEDIAS (N/mm<sup>2</sup>) (Valor esperado)</b>			
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
> 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 (L1, L2, E1, E2, A, B, C o D).

(Aportación del doctorando)

De esta forma, se pueden utilizar ambas tablas resumen, para acceder con valores de Velocidad Ultrasonidos, según el tipo de edificio – estructura que se esté analizando en cada momento.

11.- Analizados y discutidos los valores obtenidos de las “bandas de confianza”, se expone una tabla (Tabla nº 5.15) donde quedan de manifiesto los distintos valores de resistencia (R), en sus correspondientes bandas de confianza, para cada valor de las velocidades ultrasónicas (V) encontradas.

Tabla nº 5.15.

<b>PROPUESTA DE RELACIÓN DE RESULTADOS DE ULTRASONIDOS CON RESISTENCIAS ASOCIADAS</b>
---

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (m/seg)	(1) RESISTENCIA MEDIA (N/mm <sup>2</sup> )	(2) BANDAS DE CONFIANZA (95 %) RESISTENCIAS ASOCIADAS (N/mm <sup>2</sup> )	
		Banda Estrecha	Banda Ancha
<b>TODAS LAS ESTRUCTURAS</b>			
4.500	34	28 - 38	24 - 46
4.000	23	21 - 25	12 - 35
3.500	16	14 - 17	4 - 28
3.000	11	0 - 12	0 - 21
2.500	10	0 - 11	0 - 20
2.000	(*)	(*)	(*)
<b>EDIFICIO TIPO "A"</b>			
4.500	40	35 - 44	28 - 48
4.000	28	24 - 31	18 - 38
3.500	18	14 - 19	9 - 25
3.000	11	8 - 12	2 - 20
2.500	6	0 - 11	0 - 18
2.000	5	0 - 11	0 - 18
<b>EDIFICIO TIPO "B"</b>			
4.500	32	25 - 34	18 - 40
4.000	23	18 - 22	10 - 31
3.500	17	12 - 17	6 - 27
3.000	14	10 - 14	2 - 21
2.500	13	9 - 13	2 - 21
2.000	(*)	(*)	(*)
<b>EDIFICIO TIPO "C"</b>			
4.500	33	25 - 35	18 - 42
4.000	29	24 - 30	14 - 40
3.500	24	28 - 26	10 - 35

**5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

3.000	19	12 - 21	4 - 30
2.500	12	2 - 18	0 - 24
2.000	4	0 - 17	0 - 20
<b>EDIFICIO TIPO "D"</b>			
4.500	47	36 - >40	38 - >40
4.000	26	24 - 34	18 - 40
3.500	13	11 - 16	4 - 24
3.000	6	2 - 11	0 - 18
2.500	5	1 - 11	0 - 17
2.000	(*)	(*)	(*)
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <p>(1) Los valores de la resistencia media corresponden a la estimación puntual de la resistencia de la población de pilares de hormigón chequeados. Se obtiene en base a las fórmulas de Correlación obtenidas y expuestas.</p> <p>(2) Los valores de resistencia de las "bandas de confianza" responden a un intervalo en donde se encuentra el valor de resistencia respecto a la velocidad tomada "in situ". En la banda estrecha se encuentran los valores medios y en la banda ancha, se encuentra con seguridad, (R) el valor real de la resistencia del hormigón del pilar ensayado, en cada chequeo estructural. Se obtiene de forma gráfica en base a los valores de velocidad (V).</p> <p>(*) Valores de resistencia, que se han considerado no congruentes, obtenidos de la fórmula de Regresión Cuadrática, para las velocidades ultrasónicas dadas.</p>			

(Aportación del doctorando)

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.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# 6



## **6.- CONCLUSIONES**

**Nuevas líneas de investigación.**

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

“El pensamiento estadístico será algún día tan necesario para el ciudadano eficiente, como la capacidad de leer y escribir”

Haber and Runyon, 1992



**6. CONCLUSIONES**

---



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

**6. CONCLUSIONES**

---

**6.- CONCLUSIONES.****Nuevas líneas de investigación.**

Llegados a este punto, se procede a la exposición de aquellos aspectos de mayor interés, tras el proceso de investigación llevado a cabo, cuyo resultado final puede ser utilizado como base para el diagnóstico estructural, la peritación y la toma de importantes decisiones, con una gran carga de responsabilidad, puesto que a partir de ahí, el proyectista planteará las soluciones más adecuadas para resolver el problema de la estructura de hormigón armado objeto de actuación: Reparación, refuerzo o cualquier otra intervención e incluso, si llegara el caso, la propia demolición del edificio.

Por todo ello se está en disposición de emitir las conclusiones del presente trabajo, con el siguiente esquema:

**6. CONCLUSIONES**

---

- A. De los datos iniciales del proceso de investigación.
- B. En cuanto a la localización y edad del edificio (L1 y L2; E1 y E2).
- C. En cuanto a la tipología de las estructuras (A, B, C y D).
- D. Nuevas líneas de investigación.
- E. Resumen: Tablas definitivas de correlación, propuesta de normativa.

A continuación se desarrolla cada uno de estos aspectos, con carácter de conclusiones finales:

**A.- De los datos iniciales del proceso de investigación.**

Para la interpretación y discusión de los resultados obtenidos de los trabajos de chequeo estructural, como inicio de una peritación- evaluación estructural, es necesario tener en cuenta, entre otras, las siguientes circunstancias:

- Conocimiento profundo del proceso de ensayo, de sus resultados intermedios, cálculos matemáticos, análisis estadístico y su resultado final.
- Trazabilidad de los resultados (desde la inspección previa de la estructura, toma de datos, auscultación y encargo del ensayo, hasta la recepción del Acta de Resultados y su posterior interpretación).
- Realizar un minucioso análisis comparativo de los resultados obtenidos, en distintas circunstancias, tipología, edad, etc. de la estructura estudiada.
- Analizar globalmente todos los resultados obtenidos en una misma campaña de ensayos, sobre una misma estructura de hormigón armado.
- Realizar una rigurosa y justificada interpretación de los resultados obtenidos, en base a una adecuada gestión documental y consulta bibliográfica.

Todo ello, como ya se ha indicado, con una gran dosis de rigor, que proporcionará la suficiente fiabilidad y credibilidad, a la hora de emitir un Informe Técnico – Informe Pericial (documentación oficial con la exposición de conclusiones y recomendaciones), puesto que de ahí, se tomarán decisiones de gran calado y responsabilidad, para el futuro comportamiento estructural del conjunto.

**6. CONCLUSIONES**

---

**B.- En cuanto a la localización y edad del edificio (L1 y L2; E1 y E2).**

Tras una profunda investigación con los datos exclusivos de dos de las técnicas citadas (velocidad de ultrasonidos (V) / resistencia a compresión simple (R) en probetas testigos de hormigón y la pertinente correlación entre ambos grupos de resultados) y con el análisis de su comportamiento, estudios estadísticos realizados, interpretación de resultados, para las variables L1, L2, E1 y E2 independiente, implementación de expresiones matemáticas y aplicando distintas técnicas de interpretación, se emiten las siguientes conclusiones:

- Se confirman las conclusiones de anteriores trabajos de investigación del mismo Doctorando, con las técnicas de esclerometría / ultrasonidos y ahora, en lo relativo exclusivamente a la Correlación de Resultados de Resistencia (R) en probetas testigo con Velocidades de Ultrasonidos (V).
- Se confirma la disponibilidad de gran cantidad de datos para el estudio – investigación que se planteaba en esta Tesis Doctoral, donde se alcanza el 95% de confianza en los resultados que se obtienen con las rectas y especialmente con las curvas de regresión dadas y con las denominadas “bandas de confianza”, que aparecen en los gráficos expuestos.
- 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.
- Queda demostrado y se concluye una clara diferencia entre los valores de Resistencia (R) y de Velocidad (V) en las estructuras más cercanas a la costa, respecto a las estructuras de interior, quedando patente la mayor afección a la calidad de los hormigones de las estructuras en las zonas costeras, respecto a las estructuras de hormigón ejecutadas en el interior, más alejadas de la costa. (L1 y L2 respectivamente).
- 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.
- Se proponen las siguientes fórmulas matemáticas para los modelos de correlación

**6. CONCLUSIONES**

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):

**Para todas las estructuras:**

$$\text{Resistencia media estimada} = 50,529 - 0,032 * \text{Velocidad} + 0,000006286 * (\text{Velocidad})^2$$

**Situación- Localización 1 (L1):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 56,519 - 0,035 * \text{Velocidad} + 0,000006 * (\text{Velocidad})^2$$

**Situación – Localización 2 (L2):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 21,207 - 0,015 * \text{Velocidad} + 0,000004076 * (\text{Velocidad})^2$$

**Edad 1 (E1):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 7,350 - 0,008 * \text{Velocidad} + 0,000003172 * (\text{Velocidad})^2$$

**Edad 2 (E2):**

$$\text{Resistencia media estimada} = 48,138 - 0,029 * \text{Velocidad} + 0,000005595 * (\text{Velocidad})^2$$

- 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.
- Con todo ello 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 exponen en Anejos las gráficas – curvas de regresión cuadrática, para los distintos modelos estudiados, donde de forma gráfica se pueden obtener valores de resistencia media a compresión de un elemento de hormigón, en función de la velocidad de ultrasonido, para los distintos modelos analizados. Además se aprecian las curvas con las que se han generado las franjas de mayor fiabilidad, denominadas “bandas de confianza”,

**6. CONCLUSIONES**

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. De todas estas gráficas se confirma que la curva-recta 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 (L1 – L2 y E1 – E2).

**C.- En cuanto a la tipología de las estructuras (A, B, C y D).**

Analizando los datos disponibles e interpretando los resultados para cada tipo de estructura, combinando las dos variables de localización (L1 y L2) y de edad (E1 y E2), se concluye que:

- Con los valores obtenidos, se ratifica que son totalmente fiables para estructuras de hormigón armado, en cualquiera de las cuatro tipologías analizadas (A, B, C y D).
- Existen distintos valores de resistencia (R), en función de la velocidad de ultrasonidos (V) para cada uno de los tipos de estructura estudiadas.
- Aparecen valores incongruentes de resistencia (R), especialmente en estructuras de tipo A y B, coincidiendo con los valores más bajos de velocidad de ultrasonidos.
- Se presentan las siguientes fórmulas de correlación propuestas, para cada tipo de estructura analizada:

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

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

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

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

- Se exponen en los Anejos 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

## 6. CONCLUSIONES

---

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 cuatro subpoblaciones investigadas.

De esta forma se justifica el cumplimiento de los objetivos general y específico, de la presente Tesis Doctoral, que pueden considerarse plenamente logrado, ya que se obtiene con éxito la información que se buscaba y su interpretación facilitando, se facilita la toma de decisiones en la evaluación de la seguridad estructural del elemento de hormigón armado, ya que 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.

Se puede concluir también que, en cuanto a otras consideraciones, para reparar una estructura de hormigón armado, utilizando materiales especiales del tipo resina epoxi o similares, es necesario que el elemento a reparar presente una resistencia del hormigón mayor de  $10 \text{ N/mm}^2$ , para garantizar la adecuada adherencia al soporte (BRESSON, J. 1971). Analizados los datos estadísticos de la muestra total de esta investigación, se aprecia que en el percentil 25 se encuentra el valor de resistencia de  $10,83 \text{ N/mm}^2$ . Esto indica que el 25 % de los valores de la muestra estudiada, están por debajo de esa resistencia, por lo que se puede aportar el dato de que el 25% de los pilares chequeados, no podrían ser reparados utilizando estos productos especiales, por lo que se deberían plantear otros sistemas de reparación alternativos, basados fundamentalmente en refuerzos con elementos metálicos u otros materiales, sin adherir al soporte.

### **D.- Nuevas líneas de investigación.**

Llegados a este punto, se deben plantear otras líneas de investigación, con nuevas propuestas metodológicas, en las que se considera muy interesante profundizar, para avanzar en las técnicas

## 6. CONCLUSIONES

---

descritas, destacando:

- Mejora en la definición de técnicas de inspección visual y organoléptica y de toma de datos, previa a la realización de los ensayos propiamente dichos, en un chequeo estructural, para garantizar la trazabilidad del proceso.
- Buscar métodos que mejoren y garanticen la mayor precisión en el proceso de realización de los ensayos – procesos de auscultación, tanto “in situ” como en laboratorio, por parte de los técnicos especialistas de los Laboratorios Acreditados.
- Supervisión para un estricto cumplimiento de las normas vigentes en cada momento, en todos los procesos de toma de datos y en los posteriores análisis y ensayos de laboratorio.
- Generar una nueva y más amplia metodología, que defina el número – cantidad de probetas testigo a extraer y de los ensayos de comprobación de la velocidad de ultrasonidos a realizar, optimizando cada intervención en una estructura en concreto, para conseguir una mayor fiabilidad.
- Realizar un análisis comparativo de los datos y de los resultados obtenidos de correlación entre las variables Resistencia (R) y Velocidad (V), entre distintos laboratorios, con un planteamiento inicial de contraste y posteriormente de análisis de mejora en los procedimientos de actuación y en la interpretación de resultados.
- Realización de estudios de similares características, para otras zonas geográficas o regiones españolas y su extrapolación a nivel nacional, sin olvidar la ambiciosa línea de investigación, que sería el análisis de datos con una ampliación de la población a nivel de otros países europeos y su correspondiente extrapolación.
- Trabajar con las nuevas tecnologías, generando bases de datos, que permitan disponer de una mayor cantidad de información, que mejore las conclusiones, en una peritación. En este sentido, será también de gran interés la confección de programas informáticos que permitan gestionar los datos de V para la obtención certera de los valores de R que se buscan.

Y todo ello, para dotar de la máxima fiabilidad a los resultados obtenidos y su interpretación, facilitando así la toma de decisión última, en el proceso de evaluación estructural, para una mayor confianza.



## 6. CONCLUSIONES

---

### E.- Resumen: Tabla definitivas de correlación, propuesta de normativa.

Y para finalizar, **como resumen de todo este trabajo**, se avanzan algunas ideas que confirman lo anteriormente expuesto y que deben servir de reflexión al profesional - técnico usuario de las citadas técnicas de investigación, en chequeos estructurales:

- Es necesario que en todo proceso de investigación en chequeo estructural, se tenga en cuenta la necesidad de conseguir una total fiabilidad, trazabilidad en los datos y sin duda, credibilidad, de cara al futuro usuario de los resultados, para el análisis - diagnóstico estructural.
- Se deberán tener en cuenta, como base para la reflexión, la interpretación de los resultados obtenidos y las conclusiones expuestas en cada caso, previamente a la aplicación de cualquiera de los métodos de chequeo estructural analizados y de la posterior aplicación en la peritación - evaluación estructural, en los futuros casos concretos.
- No se debe olvidar tampoco, que los resultados que se obtienen de los procesos de chequeo estructural, suponen la base para la toma de decisiones de diagnóstico y peritación estructural, con las importantes responsabilidades que como ya se ha insistido, de todo ello se derivan.
- El técnico especialista dispondrá con todo ello, de una serie de herramientas y métodos de investigación muy adecuados, para el chequeo del estado actual de las estructuras de hormigón armado convencionales.
- Es de destacar la importante información que aporta la tabla definitiva para cada modelo, (tabla nº 5.13) se presentada a anteriormente, para las variables independientes de Localización (L1 y L2) y para Edad (E1 y E2). Véanse los distintos niveles de clasificación para la calidad el hormigón.
- Para cada tipología de estructura, con las variables combinadas (Edificios del tipo A, B, C y D), se propone la tabla nº 5.14, que presenta los valores de Resistencia (R) en función de la Velocidad (V). Véase también la propuesta de Clasificación de la Calidad del Hormigón.
- Analizando los valores de V y R para las “bandas de confianza”, para todas las

**6. CONCLUSIONES**

estructuras y para los cuatro tipos de edificios, de forma independiente, se aporta la tabla nº 5.15, donde se aprecian los valores de correlación para cada una de las citadas bandas, sin clasificación de calidad, exclusivamente con valores objetivos.

- Por último y para completar la definitiva aportación de esta Tesis Doctoral a la normativa actualmente en vigor, para el análisis estructural, se expone a continuación la tabla final, (tabla nº 6.1) para una 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 en concreto:

Tabla nº 6.1

<b>PROPUESTA DE CORRELACION DE RESULTADOS (Con Velocidad y Resistencia)</b>					
<b>VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/seg)</b>	<b>RESISTENCIAS MEDIAS (N/mm<sup>2</sup>) (Valor esperado)</b>				
	<b>TODAS LAS ESTRUTURAS</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
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.

- Finalmente, con esta tabla definitiva de correlación de resultados, con y sin “clasificación de la calidad del hormigón”, se está en disposición de plantear su incorporación a la normativa que rige el procedimiento de chequeos de estructuras de hormigón armado, pudiendo combinar el uso de esta tabla con los gráficos de correlación expuestos.

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

## 6. CONCLUSIONES

---

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.

Se ha querido confeccionar este documento final de Tesis Doctoral, con un carácter eminentemente práctico, basado en un marco teórico, suficientemente experimentado, que facilite a los técnicos - especialistas - peritos estructurales del sector de la construcción, el conocimiento más profundo de los dos citados métodos de auscultación - investigación en chequeos estructurales, en elementos - piezas de hormigón armado, su aplicación, fiabilidad y la interpretación final de sus resultados, así como generar un documento básico, apto para su divulgación, como actividad necesaria para llegar al profesional - técnico usuario final, de forma directa y clara, facilitando su conocimiento y divulgación, también en el ámbito Universitario.

Se ha tratado en suma, de realizar un trabajo de investigación científica, para su directa aplicación práctica. En definitiva, una transferencia de conocimientos y de resultados a la propia sociedad.

ALICANTE, Junio de 2011.

EL DOCTORANDO

Fdo.: Jesús H. Alcañiz Martínez

Arquitecto Técnico.

Ingeniero de Edificación.

Máster en Gestión de la Edificación.



## **RESEÑA BIBLIOGRAFICA.**

La bibliografía más representativa, consultada por el Doctorando, durante el periodo de investigación y posterior desarrollo de esta Tesis Doctoral, de algunos de cuyos autores se ha hecho referencia, indicando las citas, en el interior del cuerpo del presente documento, ha sido la siguiente:

- ADDLESON. L, (2002). *Fallos en los edificios*. Consejo General de Colegios de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de España. Madrid.
- ALAMINOS, A. (1993). *Gráficos. Cuadernos metodológicos*. Centro de Investigaciones Sociológicas. Madrid.
- ALCAÑIZ MARTÍNEZ, J. H. (2002). *Estructura de hormigón armado en ambiente marino.*, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia. COAATMU.

**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

- ALCAÑIZ MARTÍNEZ, J. H. (2002). *Diagnóstico de Patología de Estructura de Hormigón Armado.*, BIA. Madrid.
- ALCAÑIZ MARTÍNEZ, J. H. (2002). *Proceso de inspección y diagnóstico de edificios.* BIA. Madrid.
- ALCAÑIZ MARTÍNEZ, J. H. (2007) *Plan de Control de Calidad.*, Revista “Región Industrial”. Murcia.
- ALCAÑIZ MARTÍNEZ, J. H. (2009) *Inspección puntos de riesgo en estructuras de hormigón armado.* Revista “Región Industrial”. Murcia.
- ARGIMÓN PALLAS J.M., JIMÉNEZ VILLA J. (1994) *Métodos de investigación aplicados.* Barcelona: Mosby-Doyma.
- BELSLEY, D.A., E. KUH, and R.E. WELSCH. (1980). *Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity.* New York, NY.
- BERMÚDEZ M.A. y ALAEJOS, P. (2009). *Ensayos de detección anticipada y control de los procesos de envejecimiento del hormigón.* Laboratorio Central Cemento. CEDEX. Madrid.
- BISHR, H.A.M. (1995). *Assessment of concrete compressive strength using the lock test.* Construction and Building Materials.
- BLOEM D.L. (2004). *Concrete strength measurement cores versus cylinders.* Proceedings Society for testing.
- BRESSON, J. (1971). *Nouvelles recherches collages dans les structures.* Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. Francia.
- BUNGE, M. (2009). *Teoría y realidad.* Editorial Gedisa. Barcelona 2009.
- BUNGEY, J. H. (1979). *Determining concrete strength by using small diameter cores.* Concrete Research.
- BUNGEY, J. H. (1989). *Testing of concrete structures.* Survey University Press. London.
- BUNGEY J. H. and MILLARD S.G. (1996). *Testing of concrete structures.* Blackie Academic and Professional.
- CALAVERA. J, APARICIO G., DELIBES A. y GONZÁLEZ I. (1975). *El relleno de taladros producidos por la extracción de probetas-testigo y su influencia en la resistencia del los pilares de hormigón armado.* “Informes de la Construcción”, Madrid.
- CEPEDA, R. (1998). *¿Medias móviles o resistencia característica?* Red Técnica

**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

Ediciones. NCH. Chile.

- CHAMBERS, J.M., CLEVELAND W.S., KLEINER B., and TUKEY, P.A. (1983). *Graphical methods for data analysis*. Duxbury Press, Boston, MA.
- COBO ESCAMILLA, Alfonso. (2001). *Corrosión de armaduras de estructuras de hormigón y sus causas*. ESCUELA DE EDIFICACIÓN, Madrid 2001.
- CONTANDRIOPOULOS AP, CHAMPAGNE F, POTVIN L, DENIS JL, BOYLE P. (1991) *Preparar un proyecto de investigación*. Barcelona: SG Editores.
- COOK TD., CAMPBELL DT. (1979) *Quasi-Experimentation. Design & Analysis Issues for Field Settings*. Boston: Houghton Mifflin Company.
- DOMINGO R. and HIROSA S. (2008). *Correlation between concrete strength and nondestructive test*. Civil Engineering. FEA.
- FACAOARU I. and LUGNANI C. E & FN Spon. (1993). *Contributions to the diagnosis of stone and concrete historical structures using non-destructive techniques*.
- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1999). *Hormigón*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (2002). *Patología y terapéutica del hormigón armado*. Editorial Dossat, S.A. Madrid.
- FREUND, J. , WILLIAMS, F. Y PERLES, B. (1992). *Estadística para la Administración con enfoque moderno*. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana.
- FRIEL, S. , CURCIO,F. Y BRIGHT, G. (2001). *Making sense of Graphs: critical factors, influencing comprensión y instructional implication*. Journal of Research in Mathematics Education.
- GARRIDO HERNÁNDEZ, A. (1996). *Aseguramiento de la Calidad en la Construcción*. ICCE – CARM.
- GARCIA MESEGUER, A. (2004). *La fisuración en vigas de hormigón armado*. Informes de la Construcción.
- GÓMEZ GARCÍA, J. y ARANDA GALLEGO, J. (2002). *Fundamentos de estadística para economía y administración de empresas*. Diego Marín.
- GÓMEZ GARCÍA, J. y ARNALDOS GARCIA, M. F. (2000). *Introducción a la estadística*. U. M. V.
- GOSÁLVEZ J., F.J. JUANES, L. VERGARA, R. MIRALLES, (2002). *Sistema*

**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

- modular de adquisición y procesado de señales ultrasónicas.* II Congreso Iberoamericano de Acústica, Madrid.
- GRUBBS, F.E., and G. BECK. (1972). *Extension of samples sizes and percentage points for significance test of outlying observations.* Technometrics.
  - GUSTAV HEMPEL, C. (1988). *Modelo deductivo: Concepto en ciencia empírica.* Viena.
  - HENRY J.L. (2009). *Optimización del control de la resistencia de hormigones endurecidos mediante ultrasonidos.* UPB.
  - HENZEL. J. and FREITAG, W. (1969). *The determination of the compressive strength of concrete in structure with the aid of test cores of small diameter.*
  - HERNÁNDEZ, M. G., IZQUIERDO M.A.G., A. IBÁÑEZ, ANAYA J.J., ULLATE, L.G. (2000). "Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE", Ultrasonics Review.
  - HILDEBRAND, D. Y LYMAN OTT, R. (1997). *Estadística.* Addison – Wesley Iberoamericana.
  - HO, LEVIS. (1987) *Carbonation of concrete. Cement and concrete research.*
  - HOLA J., SCHABOWICZ K. and STAWISKI B. (2003). *Atypical Applications of Ultrasonic Method in Testing of Concrete Structures.* Institute of Building Engineering. University of Technology. Wroclaw. Poland.
  - HOSTALET ALBA, Francisco. (1994). *Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo de hormigón.* Escuela de Ingenieros de Caminos, UPC. Barcelona. Informes de la Construcción. Actualización 2006.
  - JIMÉNEZ MONTOYA, MESEGUER y MORÁN. *Hormigón Armado.* 9ª Edición.
  - JONES R. (1962). *Non destructive Testing of Concrete.* Cambridge University Press. London.
  - JONES R. y FACAOARU, I. (2007). *Recommendations for testing concrete by ultrasonic pulse method.* Materials and Structures nº 10.
  - JONES, R. y FACAOARU, I. RILEM (2007). *Analysis to answers to a questionnaire on the ultrasonic pulse technique.* Paris.
  - KLEINBAUM, DG., KUPPER, LL., MORGENSTERN, H. (1982) *Principles and Quantitative Methods.* Belmont, California: Lifetime Learning Publications. Wadsworth.
  - L'HERMITE ROBERT. (2003). *Fabricación y puesta en obra del hormigón.*
  - LIMAYE B. R. (2002). *Need for non – destructive testing (NDT) of reinforced concrete.*

**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

- Predicce Assurance Improve. Mumbai.
- LONGMAN, NEVILLE, A.M., (1995). *Properties of Concrete*, Harlow.
  - LOUIS, M., PRADO, R., SPAINANI, Y., GARCIA, E. M., (2008) *Diagnóstico de materiales pétreos*. Universidad de Alicante (U.A.).
  - MACGREGOR, J.G. (1976). *Safety and limit states design for reinforced concrete*. Canadian Journal of Civil Engineering.
  - MATERAZZI, BRECCOLOTTI e ROGARI. (2007). *Analisi della sicurezza strutturale di un edificio di c.a. sito in Perugia*. Università di Perugia.
  - MICHAEL BARTLETT, F. and MACGREGOR, J (1994). *Assessment of concrete strength in existing structures*. Civil Engineering. Alberta University. Canadian.
  - MICHAELS T. E. and JOHNSON S. (2005). "Ultrasonic Methods for Detection of Microporosity in Composite Materials" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation.
  - MILTON JS, TSOKOS JO. (2001) *Estadística para la ciencia*. Madrid: Interamericana McGraw Hill.
  - MINNAARD, V. , MINNAARD, C. , RABINO, C. ET AL (2002). *El uso de las gráficas en la investigación aplicada*. Revista Iberoamericana de Educación. OEI.
  - MIRALLES, R., VERGARA L. (2000). "Material Classification By HOS Analysis of Ultrasonic Signals"., European Signal Processing Conference. Finlandia.
  - MORRIS, VICO y VÁZQUEZ. (2001). *Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements*. Corrosion science. Elsevier.
  - MUÑOZ HIDALGO. M. (2003). *Diagnosis y causas en patología de la edificación*. Sevilla.
  - MURPHY Thomas and LAU Alex. (2008). *Manejo de valores atípicos*. ASQC Quality Press.
  - NASSER AHMAD Mohiuddin. (1995). *Use of small diameter cores in evaluation of in-situ concrete strength*. Faculty of Graduate Studies. Saudi Arabia.
  - NAVARRETE M<sup>a</sup>.A. (1992). *IV Jornadas Técnicas de Laboratorios Acreditados*. Sevilla.
  - NEVILLE A.M. (1981). *Properties of concrete*. Pitman Publishing Ltd. London.
  - NORMA TECH. (2004). *Concrete core testing for strength*. Concrete Society Technical Report nº 11. London.



**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

- PÉREZ SÁNCHEZ, M. (1998). *Relación entre la resistencia a compresión de probetas testigo monoíticas*. Materiales de Construcción IETCC.
- PÉRTEGA DIAZ, S. y PITA FERNÁNDEZ, S. (2003). *Determinación del tamaño muestral*. Atención Primaria. Universidad de la Coruña.
- POPER, Karl. *La lógica en la investigación científica* Editorial LAIA. Londres.
- PRADO, R., GARCIA, E.M., LOUIS, M., SPAIRANI, Y. *Caracterización de morteros para la restauración arquitectónica*. Universidad de Alicante (U.A.).
- REVUELTA CRESCO, D. y GUTIÉRREZ JIMENEZ, J.P. *Estimación de la resistencia a compresión del hormigón mediante el muestreo, extracción y rotura de probetas testigo*. IET CC y CSIC. Madrid. España.
- RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, M. (1999). *Influencia de la humedad del hormigón sobre la velocidad del pulso ultrasónico*. Cemento y Hormigón.
- RUIJIE Liu. (1996). *The diameter compression test for small diameter cores*. Materials and Structures.
- SIRVENT CASANOVA, I. (1997). *Tecnología y terapéutica del hormigón armado*, Ediciones ITC 1ª Edición. Alicante.
- SNELL L. M., (2007). *Acceptance of concrete test results*. Building code requirements for structural concrete. London.
- SOLÉ Albert. (1987). *El método de ultrasonidos aplicado a la determinación del estado de las estructuras de hormigón*. Tesina de Especialidad. ETSICCP – UPC.
- SOLIS – CARCAÑO y MORENO (2008). *Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity*. Constructions and Materials.
- TOBIO, J.M. (1967). *Ensayos no destructivos – métodos aplicables a la construcción*. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid.
- VICO, A. MORRIS, W. and VÁZQUEZ, M. (2001). *Durabilidad del hormigón en ambiente marino*. Jornadas SAM – CONAMET. Argentina.
- WELSCH, M. (2004). *Cylinder core sampling and compression testing*. STS Engineering Consultant, C. L. Bangkok.
- VARIOS *Jornadas Internacionales de Mantenimiento*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Barcelona. 2002.
- VARIOS. *Actas del Congreso de Profesores de la Asignatura de “Materiales de*

**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

- Construcción*” de las Escuelas de Arquitectura Técnica de España. Madrid 2007.
- VARIOS. *Técnicas avanzadas de evaluación estructural*. IECA Levante. Valencia, Noviembre 2000.
  - VARIOS. *Control Estadístico del Hormigón Estructural*. ACHE Madrid, Noviembre 2003.
  - VARIOS. *Actas de las I Jornadas de Investigación en Edificación*. EAT - UPM. Madrid, Mayo de 2007.
  - VARIOS. *Actas de las II Jornadas de Investigación en Edificación*. EAT - UPM. Madrid, Diciembre de 2010.
  - VARIOS. *Patología y rehabilitación de hormigón armado*. AIDICO. Valencia, Octubre 2006.
  - VARIOS. *Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón*. INTEMAC. Vizcaya 1987.
  - VARIOS. *La durabilidad de las estructuras de hormigón*. Colegio Oficial de Arquitectos Técnicos de Murcia. COAATMU 1994.
  - VARIOS. *Corrosión y control de corrosión de estructuras de hormigón armado y pretensados*. Instituto Español de Corrosión y Protección. Madrid 2003.
  - VARIOS. *Ultrasonic Testing of Concrete*, Controls SpA. Cat. E004-6, 1987.
  - *Tames Instrument Ino*. Instruction Manual for R-Meter, Model C-4956.
  - VARIOS. *Catálogo de los Servicios Técnicos de Investigación*. Universidad de Alicante (U.A.) Alicante 2008...
  - VARIOS. *Guidebook on non - destructive testing of concrete structures*. International Atomic Energy Agency. Vienna 2002.

**NORMAS Y CÓDIGOS:**

- “CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN”. Comisión de Redacción. Edición Madrid 2006, Ministerio de Vivienda y Ministerio de Gobernación.
- “INSTRUCCIÓN E H E - 08” Comisión Permanente del Hormigón M.F. 2008. Primera Edición. Edición Revisada 2010.
- UNE-EN 12390-3:2003 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la*

**RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

- resistencia a compresión de probetas.* Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- UNE-EN 12504-4: 2004 *Ensayos mediante el uso de ultrasonidos.* Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
  - ACI-214-77. Reaffirmed 1983. *Recommended practice for evaluation of strength test results of concrete.*
  - ACI 318M – 08. Building code requirements for structural concrete. (Chapter 20).
  - ACI 301-84. 1984. *Specification for structural concrete for buildings.* American Concrete Institute.
  - ASTM-C-42-82. *Standard method of obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete.*
  - ASTM – E – 178 – 08. *Standard Practice for dealing with outlying observation (Manejo de los valores atípicos).* American Society for testing and materials (ASTM). Philadelphia.
  - B.S. 1981 – 1983 *Testing concrete. Method for determination of the compressive strength of concrete cores.*
  - BSI. BS 6089:1981. *Guide to assessment of concrete strength in existing structures.* British Standards Institution,
  - UNE-EN 12390-4:2001 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo.* Enero 2001. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR
  - A.C.I. (1975). *Building Code Requirements for Reinforced Concrete.* ACI Journal.
  - CANADIAN STANDARD ASSOCIATION. 1988. *Design of concrete structures for building.*
  - BRITISH STANDARD INSTITUTION. London 1992. *Methods of testing concrete for strength.*
  - REGLES BAEL 99. Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.



## **RELACIÓN DE FOTOGRAFÍAS, TABLAS Y GRÁFICOS**

### **Fotografías**

Toda la documentación fotográfica que se aporta, ha sido realizada por el doctorando, durante el proceso de investigación y desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Fotografía nº 1: Inspección del proceso de extracción de una probeta testigo.

Fotografía nº 2: Inspección de una probeta testigo.

Fotografías nº 3 y 4: Ensayo mediante Ultrasonidos.

Fotografía nº 5: Comprobación dimensión de un pilar (Para ultrasonidos).

Fotografías nº 6 y 7: Realización del Ensayo de Ultrasonidos.

Fotografías nº 8 y 9: Comprobación de la Profundidad de carbonatación (Durabilidad).

Fotografías nº 10 y 11: Comprobación datos ultrasonidos por el doctorando.

Fotografías nº 12, 13, 14 y 15: Análisis profométrico: Comprobación posición armaduras.

Fotografía nº 16: Investigación previa a la extracción de una probeta testigo.

Fotografías nº 17 y 18: Comprobación profundidad de carbonatación “in situ”.

Fotografías nº 19, 20 y 21: Comprobación profundidad de carbonatación en laboratorio.

Fotografías nº 22 y 23: Proceso de extracción de una probeta testigo de un pilar de hormigón.

Fotografías nº 24, 25 y 26: Detalle de las probetas testigo refrentadas, antes de su ensayo.

Fotografía nº 27: Probetas testigo ya ensayadas.

Fotografía nº 28: Corrosión de armadura por afección ambiental.

Fotografía nº 29: Proceso avanzado de corrosión de armaduras.

Fotografía nº 30: Trabajos de investigación.

## **Tablas**

Las tablas se identifican por el capítulo en que se encuentran y por su número de orden, dentro de cada capítulo.

Tabla nº 2.1: Clasificación de la calidad del hormigón.

Tabla nº 2.2: Clasificación de la calidad del hormigón.

Tabla nº 3.1: Factores e corrección

Tabla nº 3.2: Factores de conversión.

Tabla nº 3.3: Factores de corrección por compactación.

Tabla nº 4.1: Tabal de datos de partida.

Tabla nº 5.2: Pruebas intersujetos para R

Tabla nº 5.3: Pruebas intersujetos para V

Tabla nº 5.4: Valores estadísticos descriptivos L1

Tabla nº 5.5: Valores estadísticos descriptivos L2

Tabla nº 5.6: Valores estadísticos descriptivos E1

Tabla nº 5.7: Valores estadísticos descriptivos E2

Tabla nº 5.8: tabla de resistencias medias, para fórmula de regresión Cuadrática.

Tabla nº 5.9: valores descriptivos para todas las subpoblaciones.

Tabla nº 5.10: Correlaciones para todas las poblaciones.

Tabla nº 5.11: Poder explicativo, para todas las poblaciones.

Tabla nº 5.12: Clasificación de calidad del hormigón.

Tabla nº 5.13: Propuesta de clasificación de calidad del hormigón (L y E)

Tabla nº 5.14: Propuesta de clasificación de calidad del hormigón (A, B, C y D).

Tabla nº 5.15: Propuesta de relación de resultados R y V.

Tabla 6.1: Propuesta de correlación de Resultados (Para todas las tipologías estructurales)

## Gráficos

Los gráficos se identifican por el capítulo en que se encuentran y por su número de orden, dentro de cada capítulo.

Gráfico 3.1: Esquema de diagrama de caja

Gráfico 3.2: Gráficos PP – QQ.

Gráfico 3.3: Esquema de bandas de confianza.

Gráfico 5.1: Diagrama de caja Resistencia.

Gráfico 5.2: Diagrama de caja Velocidad.

Gráfico 5.3: Diagramas de caja R y V

Gráfico 5.4: Histograma y Curva de Gauss.

Gráfico 5.5: Gráficos PP – QQ. Resistencia

Gráfico 5.6: Gráficos PP – QQ. Velocidad.

Gráfico 5.7: Diagrama dispersión para situación - localización

Gráfico 5.8: Diagrama dispersión para edad

Gráfico 5.9: Recta de regresión.

Gráfico 5.10: Curva de regresión.

Gráfico 5.11: Valores medios localización para R.

Gráfico 5.12: Valores medios localización para V.

Gráfico 5.13: Valores medios edad para R.

Gráfico 5.14: Valores medios edad para V.

Gráfico 5.15: Diagramas de caja de V para localización.

Gráfico 5.16: Diagrama de caja de R para localización.

Gráfico 5.17: Recta de regresión L1 y L2

Gráfico 5.18: Curva de regresión L1 y L2

Gráfico 5.19: Diagramas de caja de R.

Gráfico 5.20: Diagrama de caja de V.

Gráfico 5.21: Recta de regresión E1 y E2

Gráfico 5.22: Curva de regresión E1 y E2

Gráfico 5.23: Curva de regresión. Edificios A

Gráfico 5.24: Curva de regresión. Edificios B

Gráfico 5.25: Curva de regresión. Edificios C

Gráfico 5.26: Curva de regresión. Edificios D.

NOTA:

Las tablas, cuadros y gráficos, que no se numeran, corresponden a información obtenida directamente del Programa Informático utilizado para el tratamiento estadístico, con los comentarios e interpretación de los aspectos más relevantes de cada uno de ellos.

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



## **A N E J O S:**

### **GRÁFICOS DE CORRELACIÓN DE RESULTADOS V Y R.**

A continuación se presentan una serie de gráficos, que se han confeccionado y manejado durante el proceso de investigación y desarrollo de esta Tesis Doctoral, para comprobar el comportamiento de los resultados de la correlación, en las distintas circunstancias y para los distintos tipos de estructuras analizadas:

- Para todas las estructuras.
- Para bandas de Localización 1 (L1).
- Para bandas de Localización 2 (L2).
- Para bandas de Edad 1 (E1).
- Para bandas de Edad 2 (E2).



- Para Edificios Tipo “A”.
- Para Edificios Tipo “B”.
- Para Edificios Tipo “C”.
- Para Edificios Tipo “D”.

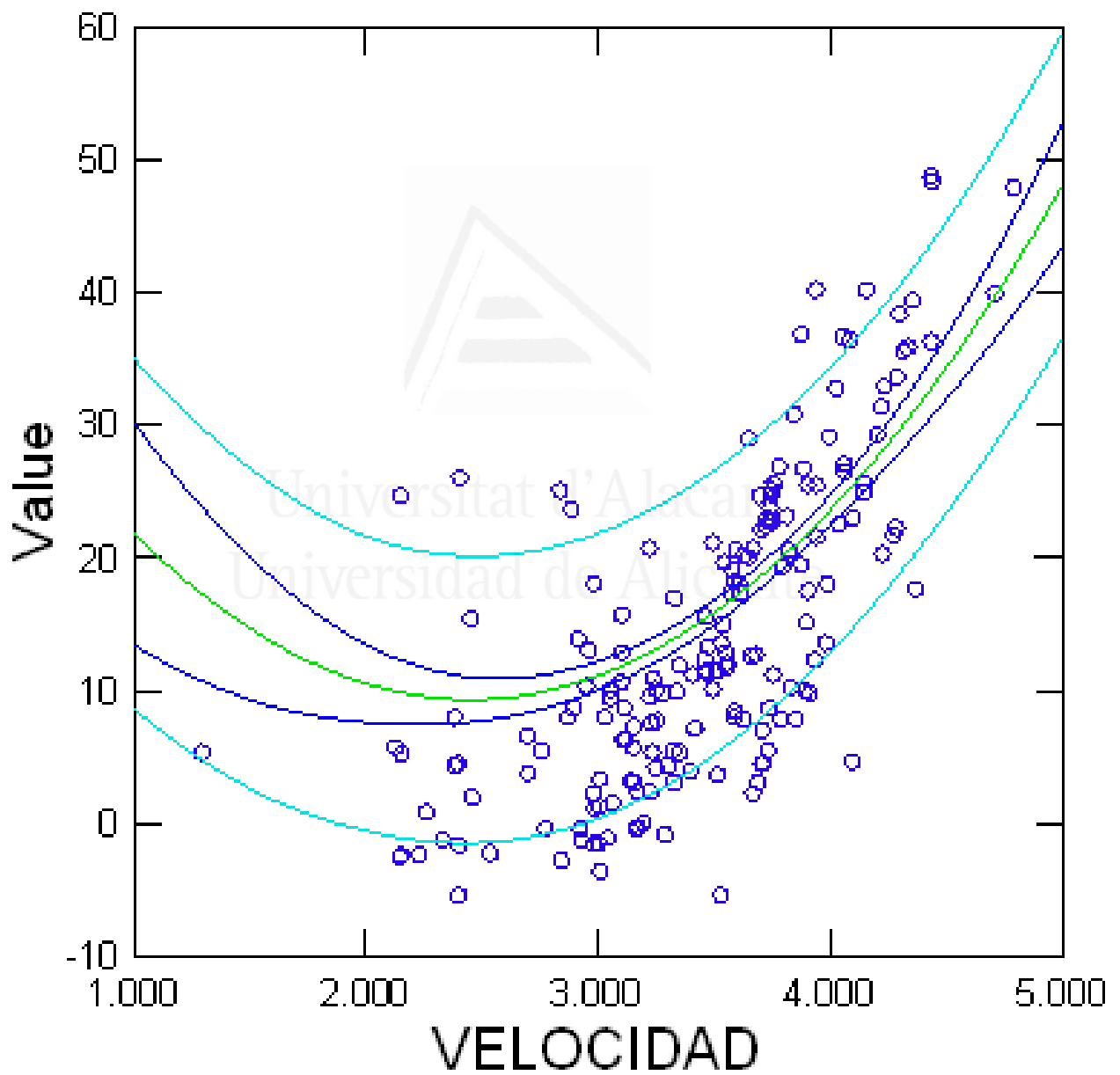
Con el uso de estas gráficas, se pueden obtener los valores de Resistencia (R), en función de los valores de Velocidad (V), para cada tipo de estructura.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para todas las estructuras.

## Confidence and Prediction Intervals

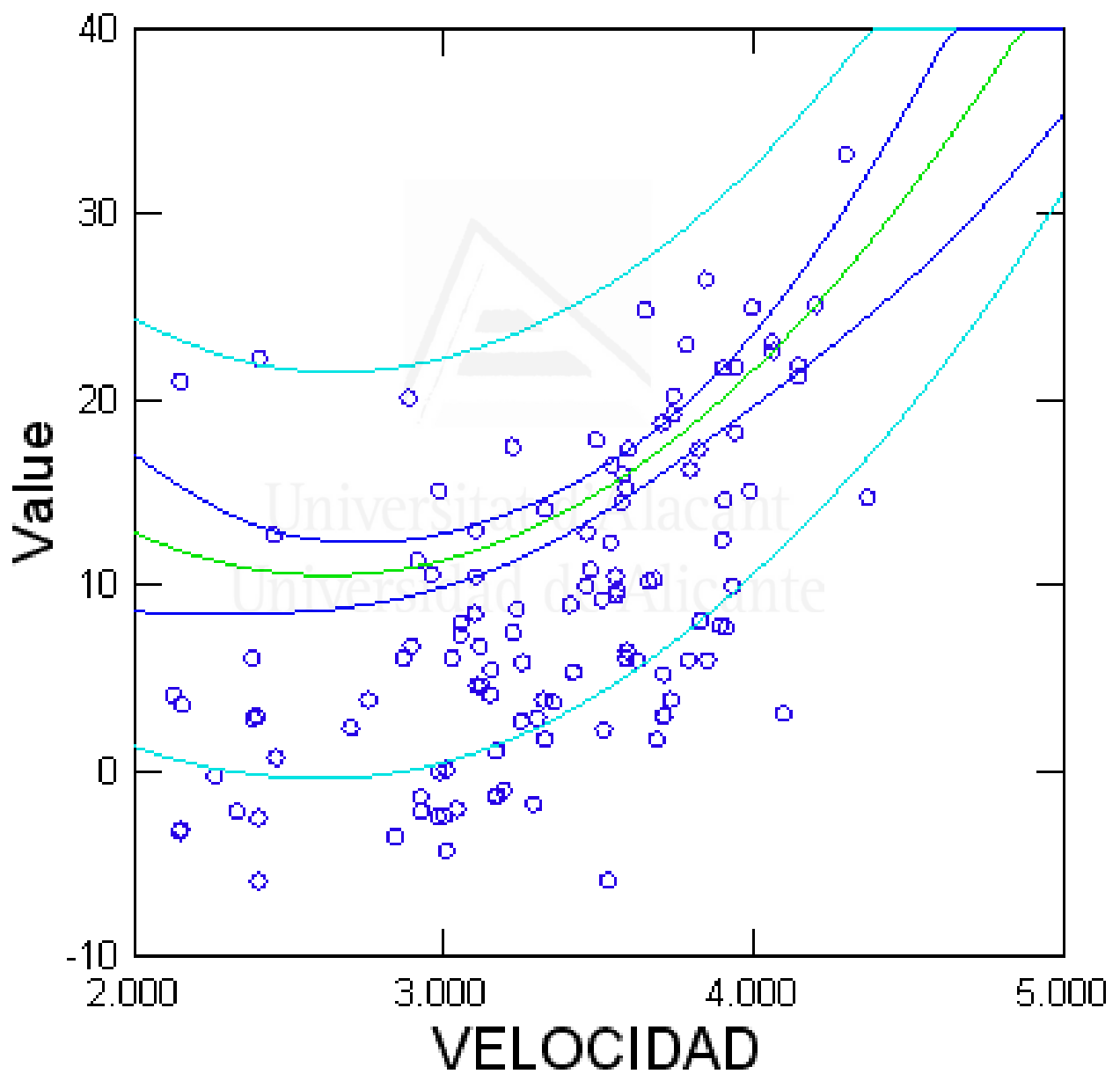




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para bandas de Localización 1 (L1).

## Confidence and Prediction Intervals

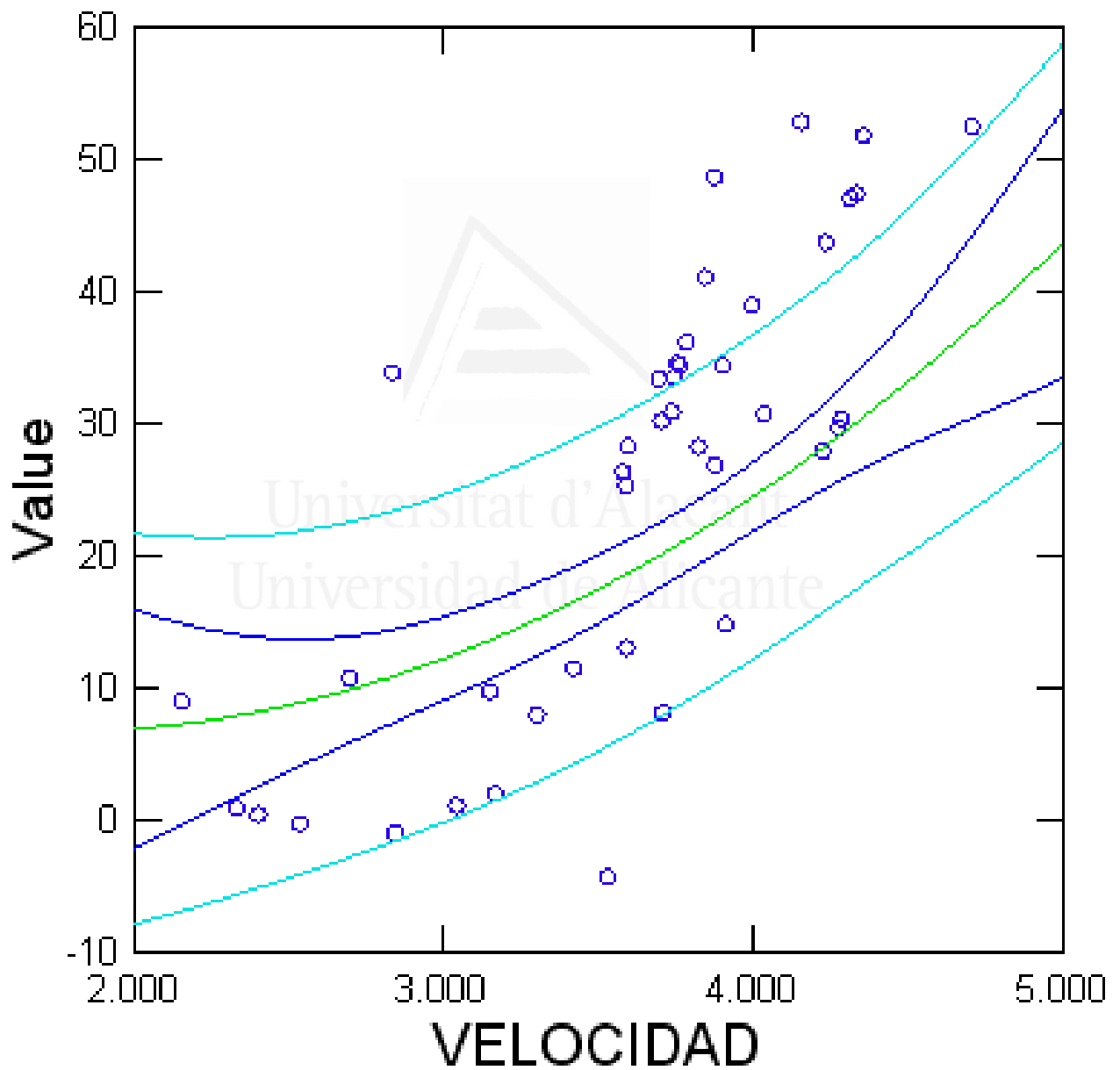




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para bandas de Localización 2 (L2).

## Confidence and Prediction Intervals

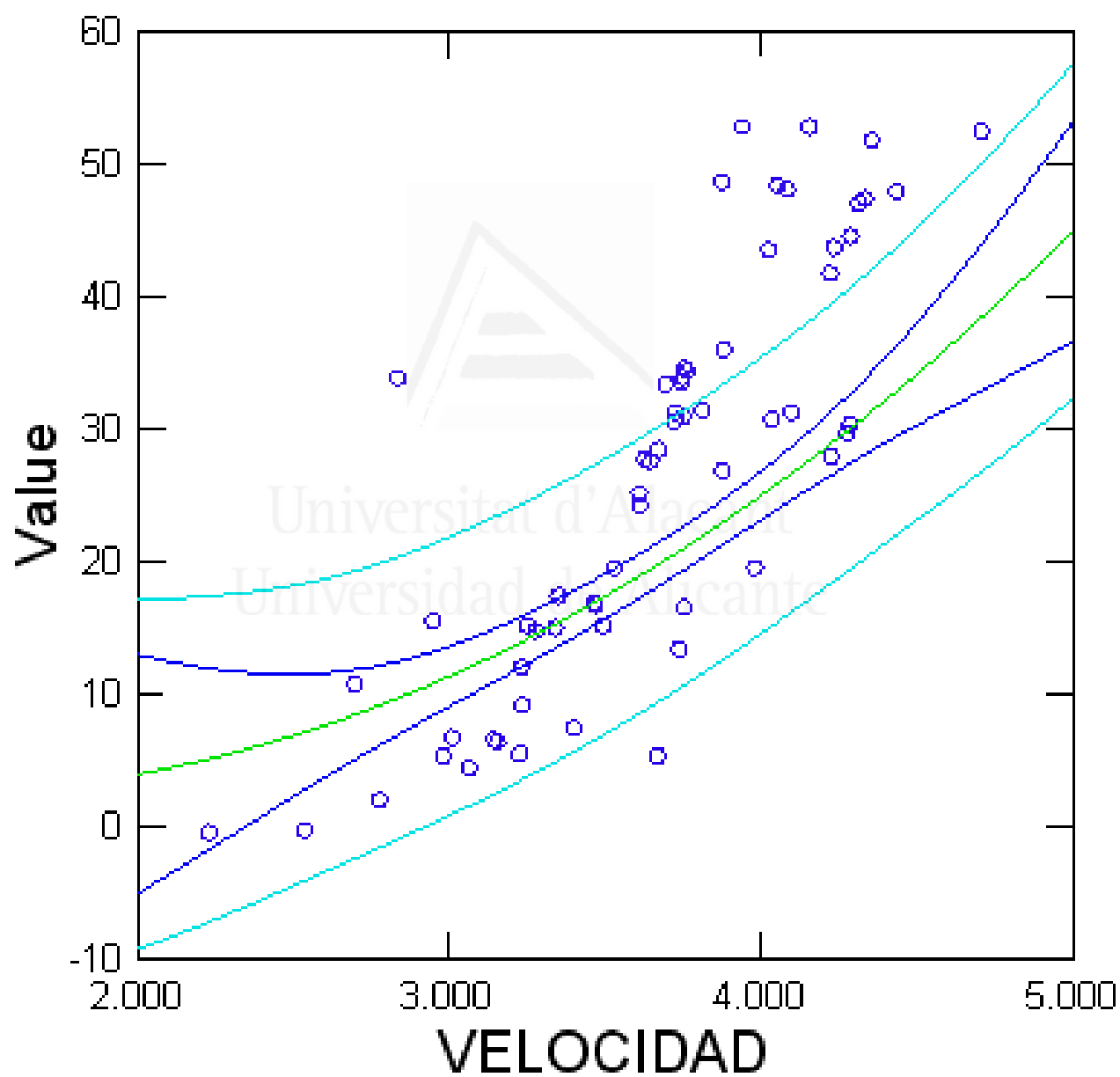




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para las bandas de Edad 1 (E1).

## Confidence and Prediction Intervals



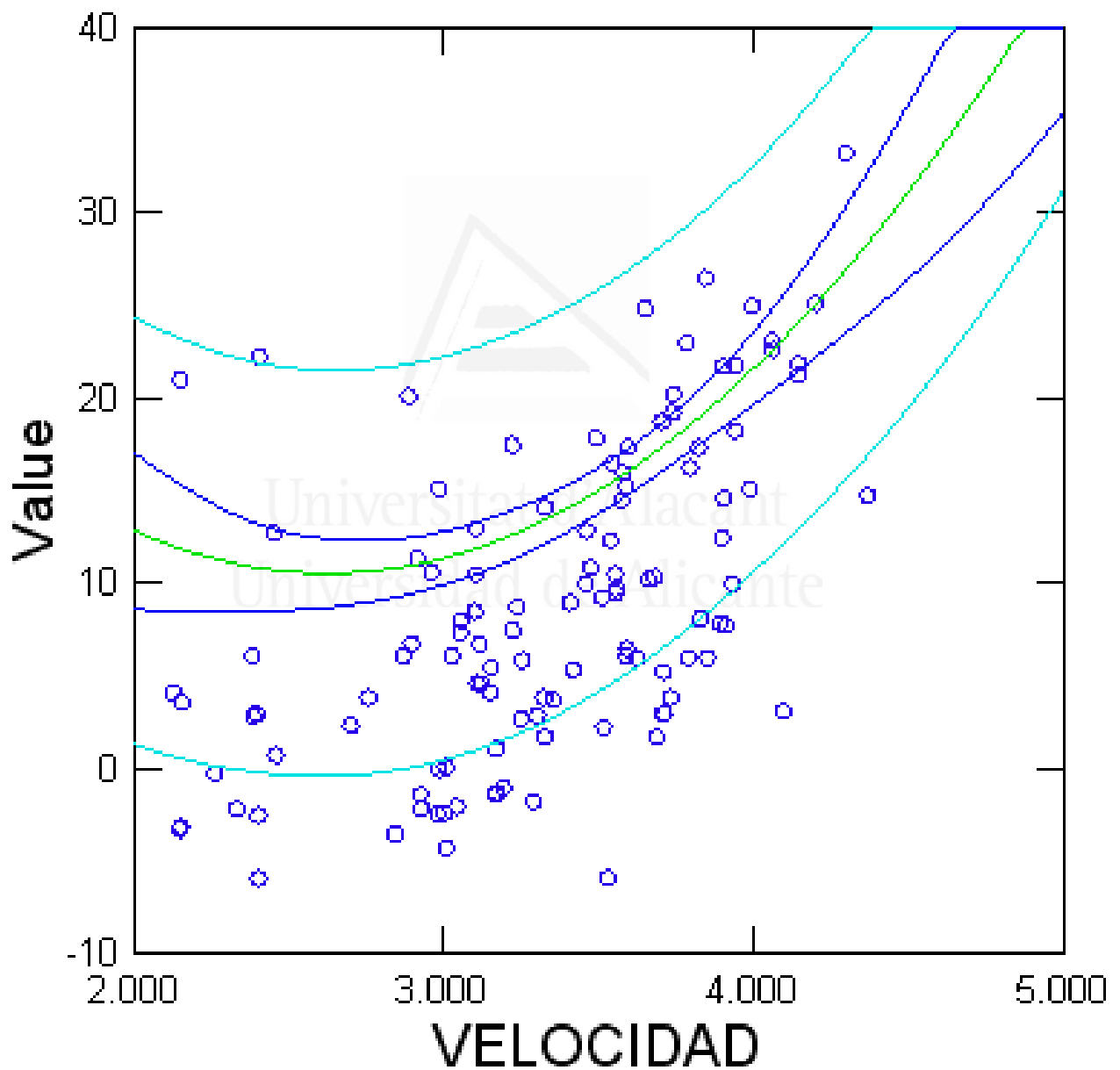




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para bandas de Edad 2 (E2).

## Confidence and Prediction Intervals

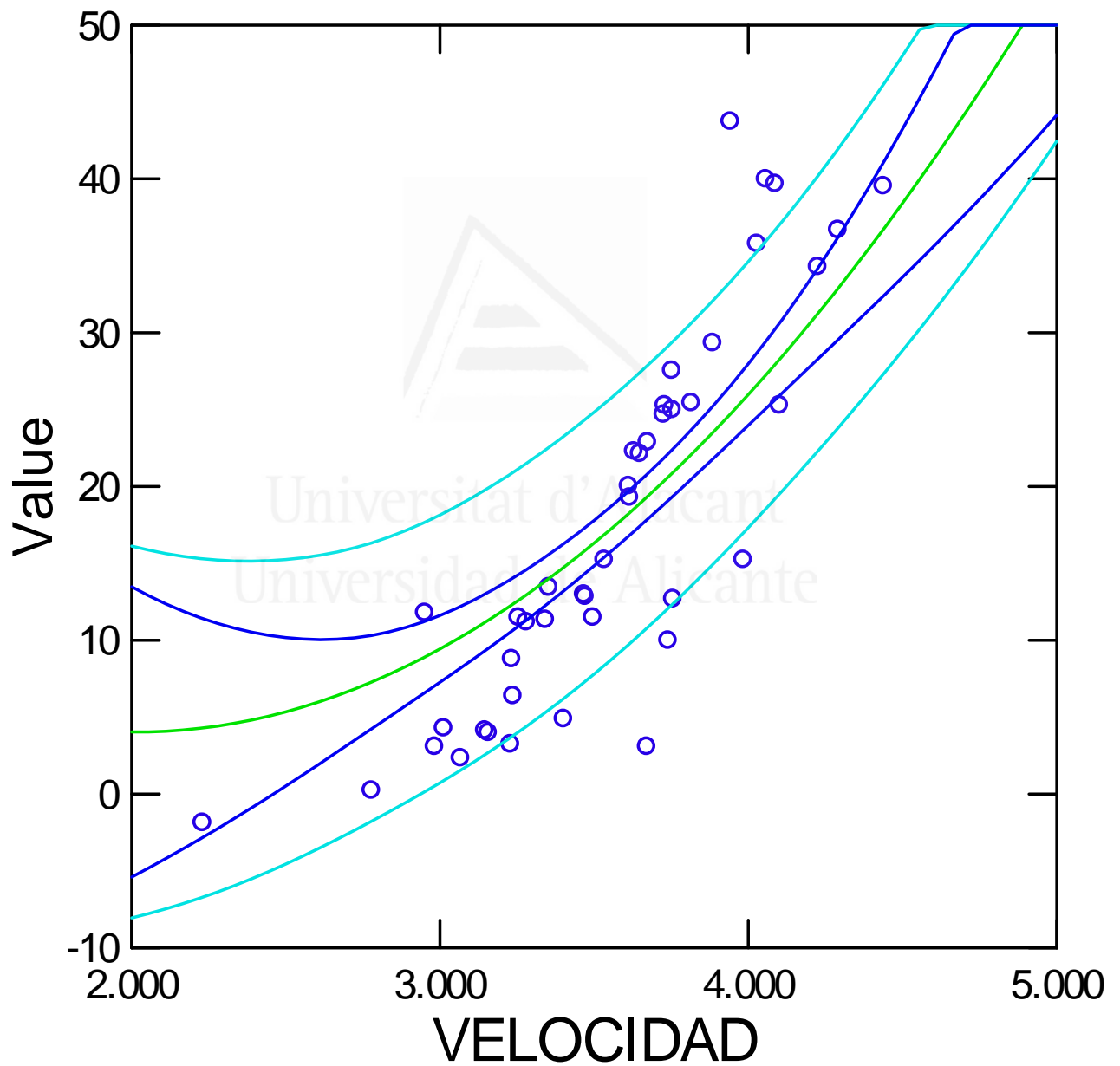




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para EDIFICIOS Tipo "A".

## Confidence and Prediction Intervals

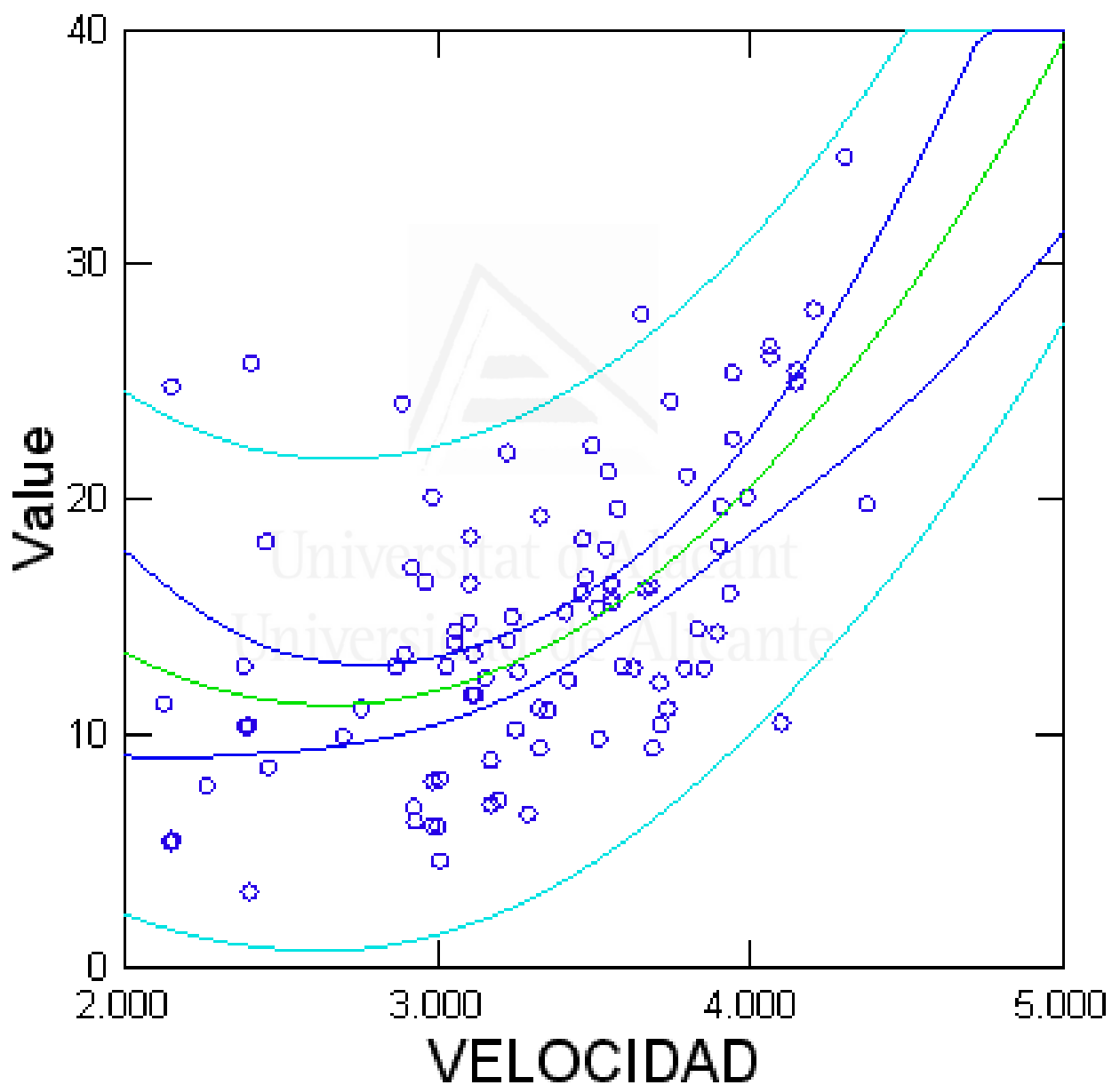




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para EDIFICIOS Tipo “B”.

## Confidence and Prediction Intervals

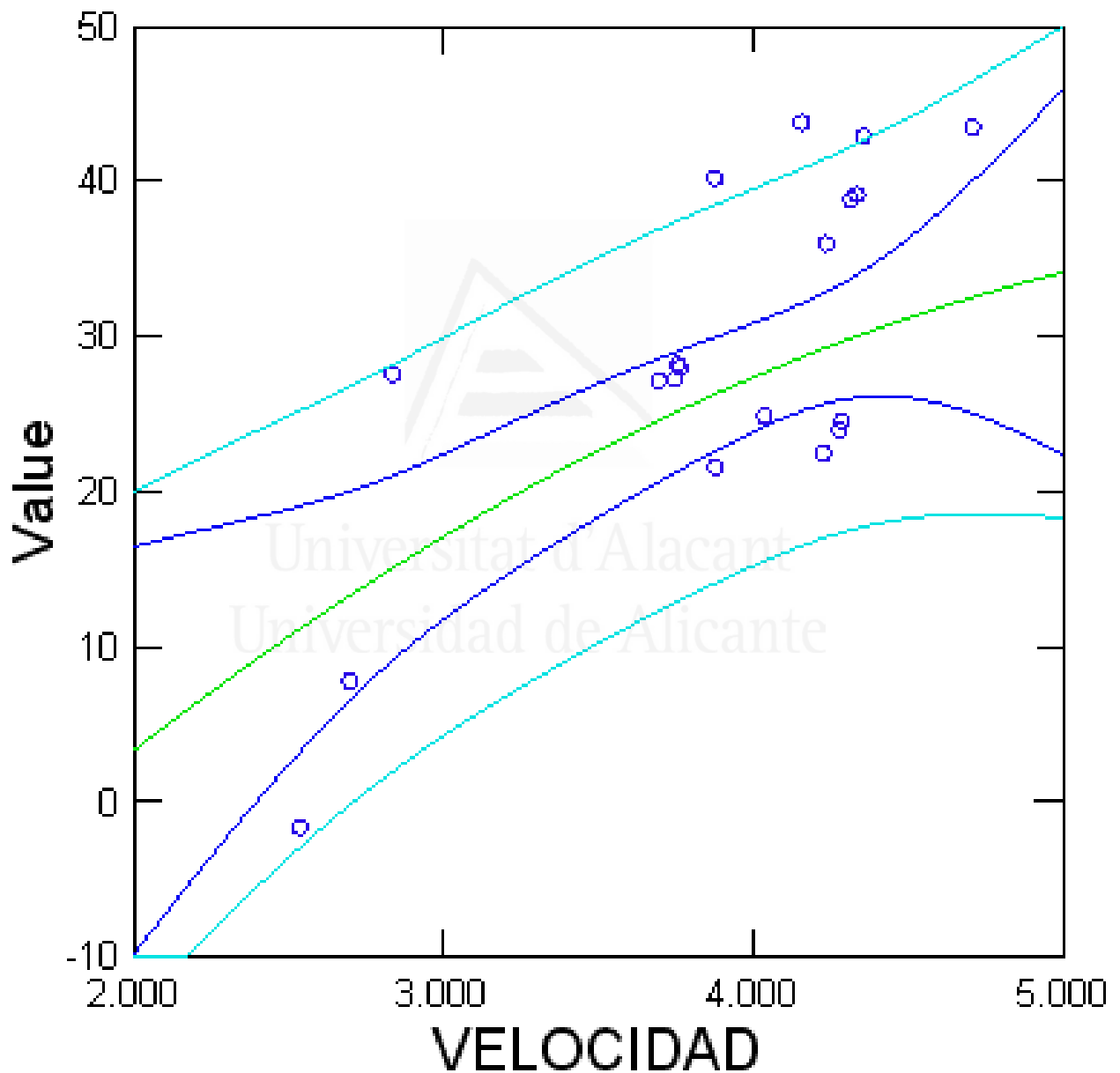




Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para EDIFICIOS Tipo “C”.

## Confidence and Prediction Intervals







Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

Para EDIFICIOS Tipo “D”.

## Confidence and Prediction Intervals

