

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I

MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA  
LÍNEA CONSTRUCCIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA



## “CORRELACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE DETECCIÓN NO DESTRUCTIVOS DE ANOMALÍAS EN EL HORMIGÓN”

Detección Visual, Resistividad Eléctrica, Velocidad Ultrasónica y Esclerómetro.

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autor:

Arquitecta Valeria Badilla Eyherregaray

Tutor: Dr. Arq.Joan LLuis Zamora i Mestre

Barcelona Abril 2014

Impreso en Santiago de Chile, 15 de abril 2014.

### Agradecimientos

A mi tutor Joan Lluís Zamora i Mestre, por su iniciativa, apoyo y constante motivación para sacar adelante esta investigación. A la UPC, por entregarme los conocimientos que hoy me convierten en una profesional mejor. A mi familia, que siempre estuvieron conmigo a pesar de la distancia, son parte fundamental de este proceso, los adoro. A mis amigos Chilenos y de Barcelona, todos complementaron con alegría y compañerismo el día a día. A quienes me ayudaron, Laia Arimany, días enteros sobre el andamio acompañándonos; Luis, apoyándome a la distancia y aportándome tus ideas.

Mil Gracias a todos.



# RESUMEN

El desarrollo de nuevas tecnologías en arquitectura y construcción, es sin duda, un desafío constante. No por tener un excelente material de construcción como el hormigón, será un campo infértil de investigación, sino más bien por el contrario, siempre se buscará mejorar, avanzar, generar mayores conocimientos e innovaciones que estén al día con las necesidades del medio ambiente, de la demanda, de la ciencia.

Esta investigación se basa en la utilización de los métodos no destructivos de detección de anomalías en el hormigón disponibles y de fácil utilización, comenzando por el más básico y primario como lo es la detección visual, para llegar a métodos más sofisticados como la Resistividad Eléctrica, sin dejar de lado técnicas conocidas como el Esclerómetro o menos conocidas pero con bastantes estudios y tiempo de investigación como el uso de Ultrasonidos.

El propósito del desarrollo de este trabajo es entender la correlación que pueden tener los valores obtenidos con estos métodos de evaluación para lograr una visión más amplia de las anomalías que pueda presentar una estructura de hormigón, del mismo modo en que la medicina se han relacionado variadas formas de examinar síntomas de una patología para obtener un cuadro completo de la enfermedad.

El desarrollo del Trabajo Fin de Máster, propone realizar un análisis de las anomalías existentes a través del uso de ensayos no destructivos que se integran y que de esta forma participan en la planificación de reparaciones, será parte de una futura Tesis Doctoral, dicha planificación y análisis de resultados en una campaña experimental. Desde esta perspectiva, se abarcan en esta investigación la aplicación práctica de las diversas metodologías sobre un espécimen de hormigón armado a la intemperie, la relación sincrónica, su complementariedad, las lesiones y el diagnóstico, mediante técnicas que aportan la ventaja de pronosticar y detectar anomalías sin generar modificaciones lesivas. Fue posible entender que la relación entre métodos es principalmente complementaria, y aportan información relevante de la zona superficial y subsuperficial, además se presentan como un valioso método de diagnóstico constante sobre las variaciones temporales de una estructura.

Finalmente, se concluye que las tecnologías de investigación y evaluación de anomalías son parte fundamental para prevenir el tiempo de vida útil de las construcciones, como así también mejorar estos estándares mediante la prevención de patologías y fundamentalmente generar un uso armónico y sustentable de los recursos primarios para la generación de hormigón, uno de los materiales mayormente utilizado actualmente.



## ABSTRACT

The development of architecture and building technologies, it is, without a doubt, a constant challenge. Not for having an excellent construction material as concrete, it will be a sterile field of investigation, conversely, it always will seek to improve, advance and generate more knowledge and innovations that will be at day with the environment requirements, demand and science.

This research is based on the use of non-destructive methods of detecting anomalies in concrete available and easy to use, starting with the most basic and primary such as the visual detection, to reach more sophisticated methods such as the Electrical Resistivity side while known techniques as Sclerometer or less known but many studies and research time as the use of ultrasound.

The purpose of the development of this work is to understand the correlation values can be obtained with these assessment methods to achieve a broader view of the anomalies that can present a concrete structure, the same way that medicine has been linked varied ways to examine symptoms of a condition to obtain a complete picture of the disease.

The development of the Master's Thesis, proposes an analysis of the anomalies through the use of non-destructive tests integrated and thus participate in the planning of repairs. The planning and analysis results on an experimental program involved will be part of a future doctoral Thesis. From this perspective, in this research include the practical application of many methodologies on a concrete sample in the open, the synchronous relationship, complementarily, injury and diagnosis, using techniques that provide the advantage of predicting and detecting anomalies without generating harmful modifications. It was potential to understand the relationship between approaches is mainly complementary, and provide relevant information about the surface and sub-surface area also presented as a valuable method of diagnosis constant on temporal variations of a structure.

Finally, we conclude that the research technology and evaluation of abnormalities are a key part to predict the useful life of the buildings, as well as improve these standards by preventing diseases and ultimately generate a harmonious and sustainable use of primary resources for generating concrete, one of the materials currently used mostly.

# 1. INTRODUCCION

## 1.1. JUSTIFICACION Y ALCANCE

La utilización extensiva del hormigón como material principal en la construcción, hace necesaria la investigación acerca de métodos que permitan monitorear el estado en que se encuentran las estructuras y poder proyectar un plan de mantenimientos y reparaciones coordinadas con usos futuros y posibilidades de rehabilitación o transformaciones.

Por otra parte, los métodos aquí estudiados permiten tener observaciones previas inmediatas, a pie de obra de cómo se encuentra la estructura, los equipos actuales son de gran tecnología, el monitoreo es mucho más preciso; estas técnicas serán útiles para conocer el estado superficial y subsuperficial del elemento, sin necesidad de realizar prácticas destructivas analizadas en laboratorios para generar diagnósticos. Además es fundamental para nosotros como arquitectos acercar estas técnicas al quehacer profesional.

Grandes obras de hormigón son dejadas expuestas a la intemperie por lo tanto al deterioro que esto conlleva. La protección que se le da al hormigón frente a los efectos climáticos es generalmente baja y con el paso del tiempo las características mecánicas de resistencia van siendo mermadas, por un proceso natural de acciones externas como la humedad, suciedad, golpes, lluvias, erosiones, que dan

procesos de deterioro como la carbonatación y la corrosión del acero, etc.

No solo el paso del tiempo y la agresividad del entorno generan deterioro en el hormigón, al mismo tiempo una mala ejecución al momento de realizada la faena constructiva será determinante en su forma de reaccionar frente al paso del tiempo; esto afecta no solo a la durabilidad sino que también a la seguridad de las estructuras.

El alcance de este estudio se acerca más a la necesaria capacidad de poder diagnosticar estructuras de una forma rápida y simple, a través de la medición por medio de las diferentes técnicas, de un espécimen de Hormigón Armado expuesto a la intemperie. Para esto se realizaron campañas de trabajo específicas, considerando las variables que comúnmente se verían en una obra construida, como el clima, la accesibilidad, los recursos, la información básica, la maniobrabilidad de los equipos, etc.

## 1.2. ANTECEDENTES / CONCEPTOS BÁSICOS

Para comenzar el estudio, es necesario abordar conceptos básicos que nos ayudaran a comprender la temática y además crearán un campo acotado de referencias que se han tomado y se espera desarrollar.

- **Hormigón:** Es un material, producido por una mezcla homogénea compuesta por áridos finos y gruesos, cemento y agua. Según las dosificaciones, el tipo de cemento y las correctas medidas para asegurar su fraguado darán a esta mezcla las características específicas de resistencia y durabilidad como material de construcción. Dentro de la Norma EHE-08 (España, 2008) se especifican las composiciones, características mecánicas, requisitos de cálculo y especificación en obra, entre otras. Las diferentes tipologías de hormigón se pueden clasificar de la siguiente forma:

<b>Hormigón Ordinario</b>	<b>Material que se obtiene al mezclar cemento, agua y áridos minerales de tamaños varios, superiores e inferiores a 5 mm.</b>
<b>Hormigón en Masa</b>	No contiene en su interior armadura de ninguna clase. Apto para resistir esfuerzos de compresión.
<b>Hormigón Armado</b>	Hormigón con armadura de acero especial.
<b>Hormigón Pretensado</b>	Hormigón con armadura de acero especial sometida a tracción previamente a la puesta de carga del conjunto.
<b>Hormigón Mixto</b>	Es aquel en el que se emplean mezclas de dos o más componentes y los nombres de estos deberán incluirse en la denominación de hormigón
<b>Hormigón Ciclópeo</b>	Es el que tiene embebidos en su masa grandes mampuestos de dimensión mínima mayor de 30 cm. y de forma tal que el conjunto no pierda la compacidad.
<b>Hormigón Aerocluso</b>	Es el que tiene una cantidad de aire incorporado no mayor del 6% de su volumen, uniformemente distribuido en toda la masa, en forma de burbujas cuyo tamaño está comprendido entre 0.005 y 0,1 mm. (También Hormigón Aireado).
<b>Hormigón Unimodular</b>	Es el hormigón con áridos de un solo tamaño.
<b>Hormigón Ligero</b>	Compuesto con áridos ligeros, una variable es el Hormigón Celular que contiene burbujas independientes de gas, uniformemente repartidas.
<b>Hormigón Blindado</b>	Unidad de obra utilizada en pavimentaciones, compuesta por una capa de espesor variable de hormigón ordinario y otro superior de piedra embutida.
<b>Amianto-cemento</b>	Hormigón cuyo árido es el amianto o asbesto, roca fibrosa cuyas principales propiedades son la elasticidad e incombustibilidad.

- **Vida útil del Hormigón:** Según la Norma EHE-08 “Instrucción de Hormigón Estructural”, Capítulo 1, Artículo 5. (España, 2008) se definen los años de vida útil dentro de los siguientes requisitos:

- o Seguridad y funcionalidad estructural.
- o Seguridad en caso de incendio.
- o Higiene, salud y protección del medio ambiente.

Los años específicos de durabilidad estarán normados según la siguiente tabla, en cualquier caso, estos podrán cumplir con mayor cantidad de años, pero nunca menos.

VIDA UTIL NOMINAL DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURA	
Tipos de estructura	Vida útil (años)
Estructuras de carácter temporal	3-10
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandillas, apoyos de tuberías)	10-25
Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas	15-50
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100

- **Estudio Patológico:** Según el diccionario de la Lengua Española, (RAE, España, 2001) una Patología, es un conjunto de síntomas de una enfermedad. Bien sabemos que los materiales de construcción se deterioran, “se enferman” y muchas veces es por acciones variadas y conjuntas de agentes diversos.

Podríamos definir el estudio Patológico como el análisis exhaustivo del proceso patológico con el objeto de alcanzar las conclusiones que nos permitan proceder a la consiguiente reparación. Además se deben tener en cuenta ciertos criterios principales en el momento de análisis: (Broto, 2005)

- Capacidad Resistente, evaluar si mantiene los coeficientes admisibles de seguridad mínimos.
- Integridad, para definir si sufre o no roturas considerables.
- Forma, determinar si tiene alteraciones que lo alejen de su perfil inicial.
- Aspecto, para expresar si una estructura mantiene su durabilidad adecuada a simple vista.

Las patologías en el hormigón pueden clasificarse según sus orígenes, según la Enciclopedia Broto (Broto, 2005):

1. Patologías derivadas de la naturaleza original de los componentes del hormigón.
2. Patologías derivadas de errores en los procesos de fabricación y ejecución.
3. Patologías derivadas de la influencia del medio ambiente.
4. Patologías derivadas del deterioro del hormigón por agentes accidentales u ocasionales, químicos y físicos.
5. Patologías originadas por defectos y deterioro del acero.

Al ser el hormigón un material heterogéneo que se comporta como un sistema homogéneo, sin embargo, es poroso y cada componente reacciona con el medio de diferentes maneras.

El estudio patológico deberá ser capaz de revelar los síntomas que este revela y alcanzar la información necesaria para realizar un diagnóstico de calidad.

- **Métodos no Destructivos:**

Los métodos no destructivos para realizar ensayos a los materiales, han sido estudiados y desarrollados desde hace décadas, definiéndose principalmente por un conjunto de técnicas realizadas con variados instrumentos que no perjudican al material en futuro funcionamiento al momento de inspeccionar o probar el material en cuestión. Las técnicas son amplias, han sido catalogadas por diferentes autores, según la energía empleada en el ensayo, como por ejemplo, se ilustra a continuación la clasificación realizada por El Instituto Eduardo Torroja, (Tobio, 1967) .

En la actualidad no solo es interesante utilizar este tipo de técnicas que por no ser agresivas, reducen las posibilidades de afectar las construcciones a analizar, además es importante reconocer su efectividad, que no se ve menospreciada al ser comparada con métodos más invasivos como las tomas de muestras para luego analizar en laboratorio; si no que mejor dicho potencia uno de sus puntos fuertes, que es la instantaneidad con la que se puede contar al obtener resultados preliminares a pie de obra, y que por lo demás pueden ser combinados, contrastados y correlacionados sin ningún problema con otro tipo de métodos semi destructivos o destructivos.

Tipo de energía	Clase de ensayo	Aplicaciones
<b>Ondas elásticas</b>	Sónico a resonancia Ondas de choque Ultrasónico Vibraciones	Calidad Resistencia Uniformidad
<b>Acciones Mecánicas</b>	Esclerométrico Extensométrico Transformaciones diferenciales Cuerdas Vibrantes Pequeños desplazamientos	Dureza superficial Resistencia Deformación Puntual Deformaciones Desplazamientos
<b>Fuerzas Capilares</b>	Penetrantes	Determinación de fisuras
<b>Eléctrica y electromagnética</b>	Resistencia óhmica Dieléctrico Corrientes Parásitas	Humedad Proceso de Fraguado Estudio de metales
<b>Magnética</b>	Inductivo Redundancia Resonancia Magnética	Localización de defectos en alambres de acero pretensado Localización de armaduras en el hormigón Humedad en pasta de cemento
<b>Ondas Acústicas</b>	Nivel Sonoro	Micro estructura del hormigón
<b>Luminosa</b>	Observación Visual Barnices Fotoelasticidad fotoelasticimetría Ultravioleta	Estado superficial de los materiales Fisuración y deformaciones en materiales no foto elásticos Actividad hidráulica de escorias
<b>Radiaciones Nucleares</b>	Absorción de rayos y neutrones Neutrones Gammagrafía Neutrones lentos	Densidad en materiales y suelos Humedad de materiales Calidad del material Radiografía con neutrones

### 1.3. OBJETIVOS

#### GENERAL

El objetivo general de este estudio es adquirir los conocimientos teóricos y prácticos acerca de la aplicación combinada de diversos métodos no destructivos (NDT) para reconocer anomalías, lesiones, detección y medición en el hormigón; de manera de sentar las bases hacia una futura tesis Doctoral enfocada en desarrollar una investigación sobre la evaluación del éxito de líneas de reparación y autorreparación de hormigones.

#### ESPECÍFICOS

- Establecer las características propias de los métodos de medición no destructivos utilizados en este estudio, para determinar las ventajas de su uso como método para detectar las anomalías en el hormigón.
- Comparar en forma sistemática y rigurosa la capacidad de las diferentes técnicas para diagnosticar sincrónicamente un mismo espécimen de hormigón.
- Identificar las diferencias sustanciales entre cada técnica y la manera en que se complementan.
- Realizar una cartografía del hormigón lesionado que ayude a tener una visión sintética de conjunto y permita planificar estrategias de intervención para su reparación.
- Catalogar las diferentes anomalías que pueden ser detectadas por estos métodos. Valorando su característica de ser una técnica no destructiva que permita planificar una reparación y a la vez prevenir futuras complicaciones.

#### 1.4. METODOLOGIA

La metodología de esta investigación está dividida en dos partes fundamentales, la primera trata sobre las generalidades y estado del arte relacionada a las características del hormigón, como un material versátil y en constante evolución, con un enfoque hacia las patologías asociadas, causadas por alteraciones derivadas de los componentes, la fabricación, las influencias del ambiente la destrucción generada por agentes externos o derivadas a los defectos del acero, además se estudiará su evolución histórica y las normativas de reparación que existen actualmente. Además se revisará documentación relativa a las técnicas no destructivas de medición utilizadas en las campañas, donde se expondrán sus características técnicas, ventajas y posibilidades.

En segundo lugar, se desarrollan las campañas realizadas en terreno, mostrando los resultados obtenidos y realizando conclusiones primarias referentes a la efectividad de la toma de mediciones, de manera de analizar la capacidad real de obtener resultados precisos o no, su utilidad inmediata y posibilidades posteriores.

Se trabajará en realizar una cartografía de lesiones asociada a la interpretación de la información recogida, lo que ayudará a realizar la correlación entre métodos. Dicha correlación es el punto principal de esta investigación, se buscarán relaciones que potencien un método con otro, o que los complementen

de manera de ampliar al abanico de posibilidades de diagnóstico.

Finalmente las conclusiones tendrán una mirada hacia la determinación de las ventajas, desventajas y oportunidades que tiene el estudio. Confirmar que los métodos no destructivos de detección de anomalías, son técnicas prácticas con grandes alcances para realizar inspecciones en el hormigón y de esta manera optimizar la vida de las estructuras y potenciar un uso responsable de los recursos.



-PRIMERA PARTE-

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. EL HORMIGÓN EN LA CONSTRUCCIÓN

#### 2.1.1. Evolución histórica

El uso del hormigón se ha masificado mundialmente, por ser un excelente material de construcción, moldeable, resistente, de materias primas fáciles de obtener y con un campo abierto a la innovación e investigación. Se ha logrado obtener importantes avances respecto a la optimización de costos y tiempos asociados al uso del hormigón en construcción, a su vez se van desarrollando investigaciones que buscan solucionar sus problemas de envejecimiento y prestaciones, de manera de lograr un material realmente confiable y duradero. Esto ha significado que a medida que avanza el tiempo, avanzan las tecnologías como también las tipologías de hormigón existentes.

Para complementar los conocimientos relacionados a este estudio, revisaremos la evolución histórica que ha experimentado el hormigón. La palabra hormigón, al parecer tiene su origen en Roma, como una derivación del término hormazo, que significaría molde o forma. En 1788 ya fue definido como “Argamasa, compuesta de piedrecillas menudas, cal y betún, que dura infinito. También se hace sin betún.” (Rejon de Silva, 1788).

Otra definición antigua es la que realiza el Diccionario de la Lengua Catellana en 1852, “Mezcla compuesta de piedras menudas, cal y betún, la cual es tan fuerte y solida que dura siglos, y tan firme como la piedra”.

La primera evidencia encontrada de lo que se le puede llamar hormigón, fue el año 3000 A.C. en el norte de Chile, un hormigón rudimentario en el que se emplea como aglomerante algas calcinadas (huiro) mezcladas con agua de mar, cuyos morteros alcanzaban la nada despreciable resistencia a la compresión de 6 N/mm<sup>2</sup>. (Fernandez Canovas, 2006)

Existe la idea preconcebida de que el hormigón debe usar como aglomerante algún tipo de cemento, sin embargo, esto dependerá de la época histórica, de la localización y los elementos disponibles. La técnica ha demostrado que el cemento tiene un comportamiento aceptable y las investigaciones han mejorado su comportamiento, sin embargo, esto no delimita el uso de otro tipo de aglomerantes.

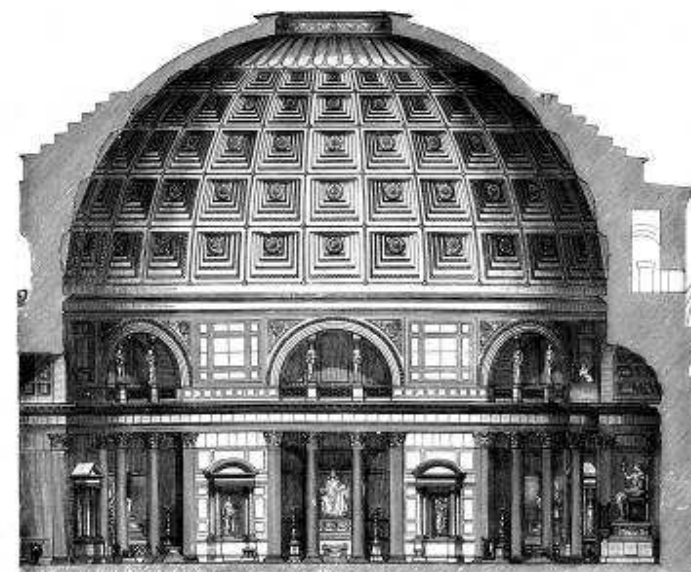
Los elementos que componen el hormigón, son de fácil y barata obtención en el medio ambiente, por lo que se puede hablar que es un material inagotable, con un futuro amplio totalmente asegurado. Por lo demás podemos referirnos a su superioridad constructiva respecto a otros materiales, como la madera o el acero, que si bien son tan nobles como el hormigón, sufren mucho más a los ambientes agresivos, a los incendios y necesitan la ejecución de nudos y juntas, las que

pueden ser el punto débil en caso de altas exigencias y que el hormigón no necesita, al actuar como un elemento monolítico una vez endurecido.

Existen evidencias desde los Egipcios utilizando mortero de yeso y de cal en sus construcciones monumentales, como también en las construcciones encontradas en Troya y Micenas, se dice que existían piedras unidas por arcilla para construir muros y con algo más de técnica en unas bóvedas construidas 100 A.C.

Un avance importante en este campo fue realizado por los Romanos, quienes fabricaban un tipo de cemento mezclando cenizas volcánicas con cal viva, ahora comúnmente llamado Cemento de Puzolana. Una obra que perdura hasta hoy es la construcción del Panteón en Roma, primitivamente fue construido el año 27 A.C., destruido en un incendio, para luego ser reconstruido nuevamente en hormigón en el año 120 A.C. por Adriano. Su cúpula tiene 44 m de luz construida en hormigón, con un lucernario central en la parte superior, además se encuentra aligerada por medio de casetones.

En el siglo I, en “Los diez libros de la Arquitectura” Vitruvio describe la composición de los morteros y la obtención de la cal, que son la base para el evolución del hormigón, sin embargo, poco fue el avance de estas técnicas luego de la caída del Imperio Romano. Recién a mitad del SXVI, gracias a la traducción realizada por Claude Perrault de los libros anteriormente citados, es cuando se reactiva la utilización de lo que se puede llamar como hormigón Romano.



Panteón Romano, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

El uso del hormigón decayó hasta que en Inglaterra fue utilizado para la reconstrucción del faro de Edystone.

En 1796, en Inglaterra, James Parker patentó un método para fabricar cemento hidráulico por calcinación de nódulos de cal con alto contenido en arcilla, llamado “cemento romano”.

Se puede considerar como padre del cemento contemporáneo a Vicant, a él se debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad y que propuso en 1817.

La primera patente para la fabricación de cemento Portland fue dada a Josegh Aspdin. Desde aquí comienzan las mejoras en desarrollar cementos que cada vez mas fueran

respondiendo a las necesidades y optimizando los procesos productivos hasta masificarlos a la industria que conocemos hoy en día. Hubo un largo camino de patentes que fue desarrollando prototipos y que si bien impulsaban la investigación, volvían engorroso el uso y su popularización. Hasta que en determinado momento, comenzaron a publicarse métodos de cálculo para dosificaciones y predimensionado de elementos constructivos de hormigón, específicamente en 1886 por Mathias Koenen.

En 1904 nace el primer volumen completo de hormigón armado, publicado por De Tedesco.

Esto es de gran importancia, ya que refleja la aceptación en el mundo estructural y constructivo de un sistema completamente nuevo y autónomo, que se hizo espacio entre otros más tradicionales y que se ha integrando de las mejores maneras a cada época.

En 1910 se introduce la enseñanza del hormigón armado en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid.

Una gran obra fue realizada entre 1923 y 1924, se realizó la primera cubierta laminar o cascara, la cúpula de Jena, de 40 m de luz y 6 cm de espesor, con una relación luz/espesor de más de 600, siendo superior a la cascara de un huevo. Su autor es el profesor Walther Bauersfeld, edificio que alberga el Planetario Carl-Zeiss.



[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

En 1929 se desarrolla la exposición internacional de Barcelona, donde el arquitecto Mies van der Rohe, diseña el pabellón para Alemania utilizando muros y cubierta de hormigón armado combinado con estructura metálica, plasmando los pensamientos del movimiento moderno, que luego adopto el uso del hormigón armado como uno de los principales exponentes constructivos para una corriente muy rupturista en su época y que continua siendo evidente referente en la arquitectura contemporánea. Este paso hacia el uso del hormigón en el diseño y arquitectura, más que en las edificaciones civiles, acerca y masifica su uso, en obras que se irán repitiendo y que reflejarán sus ventajas como sistema constructivo eficaz y a la vez estético.

En 1929 Frank Lloyd Wright, construye el primer rascacielos de hormigón.

El prefabricado de la mano de Pier Luigi Nervi encuentra su apogeo, dentro de una gran riqueza de formas y acabados.

En 1942 Eduardo Torroja utiliza las armaduras autoportantes y el hormigonado por anillos en el viaducto de Esla.

El avance tecnologico e investigativo, desde estas epocas ya cuenta con una gran variedad de exponentes, en todo el mundo, principalmente junto al movimiento moderno, como por ejemplo en Brasil en la creacion de Brasilia, y extendiendose hasta la India de la mano de Le Corbusier.

### 2.1.2. El hormigón en la actualidad

A pesar de tener la misma concepción y ser una evolución del hormigón histórico anteriormente mencionado, los cementos utilizados en la actualidad son absolutamente distintos al cemento patentado por Aspdin, las mejoras en el proceso industrial y en la composición de las adiciones y componentes hacen que el cemento actual pueda llegar a tener mayores resistencias sólo a los 28 días que las que tenía hace un año atrás, además el uso de aditivos ayuda constantemente a mejorar prestaciones tan variadas como el fraguado y la plasticidad. No solo los componentes van mejorando, también lo hacen las técnicas constructivas asociadas, como vibradores y el mismo transporte de hormigón premezclado, hacen crecer la industria.

Como todo en la ciencia, la construcción es un campo productivo donde el conocimiento nunca termina y la

actualización de los estudios es requisito para el profesional de hoy en día.

A continuación se nombran diferentes tipos de hormigón que se destacan entre los avances tecnológicos del área: (Fernandez Canovas, 2006)

- *Impregnado con monómeros o polímeros*, Esta técnica se conoce desde 1972, es posible conseguir resistencias de hasta 200 N/mm<sup>2</sup>; estos polimerizan dentro de la masa del hormigón, generan una protección a las agresiones químicas y a los ciclos de hielo/deshielo. Generalmente es utilizado en la prefabricación de piezas de hormigón, pueden ser postes, tubos, vigas, etc. El proceso de fabricación debe ser muy controlado para lograr un amasado óptimo.
- *Reforzado con fibras*, Agregar fibras durante el amasado del hormigón es una técnica que se conoce desde los años 70. Pueden ser fibras de acero, vidrio o plástico que se distribuyen de forma homogénea en la masa, aumentan sus prestaciones frente al impacto, flexión tracción, Fisuración, etc. Dependiendo el requerimiento, pueden ser confeccionados para su uso como paneles de fachada, tuberías, prefabricados en general, pavimentos, etc.
- *De alta resistencia*, Son aquellos que conjugan altas resistencias mecánicas con alta durabilidad, la técnica

es el agregado de aditivos generalmente súper fluidificantes, agregados de alto contenido puzolánicos o áridos de mayores resistencias que permiten alcanzar hasta  $140 \text{ N/mm}^2$  (realizados en pruebas de laboratorio); por otra parte son altamente impermeables que los protegen de las acciones agresivas del medio ambiente. Se conoce el uso de un hormigón de  $133 \text{ N/mm}^2$  a 56 días, en Seattle en el Columbia Center, es un rascacielos de 285 metros de alto, fue terminado el año 1985. Actualmente en la construcción de las obras del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia de Gaudi, se están utilizando hormigones de alta resistencia, HA-80 para elementos sustentadores que tengan una relevancia estructural capital.

- *Hormigones ligeros*, Son aquellos que tienen una densidad menor o igual a  $2,0 \text{ kg/dm}^3$ . Se puede obtener sustituyendo parte de la materia sólida por un gas, tiene interés para quitarle peso a las estructuras y para aumentar en forma notable la capacidad de aislante térmico del hormigón. Para seguir siendo considerado como hormigón estructural, de todas formas no podrá bajar de  $20 \text{ N/mm}^2$ .
- *Con áridos ligeros*, Son aquellos en que se sustituye parte del árido comúnmente utilizado, por otros más ligeros como la piedra pómez, sin embargo, estos son muy irregulares y alcanzan sólo entre  $5$  y  $10 \text{ N/mm}^2$  o la utilización de otros áridos artificiales aligerados con

los que se pueden obtener hormigones de estructura cerrada y resistencias a la compresión de entre  $20$  y  $80 \text{ N/mm}^2$  con densidades de entre  $1,2$  y  $1,8 \text{ kg/dm}^3$ . Se conocen experiencias desde los años 1930-1950 en Estados Unidos. Otras experiencias Europeas como en Noruega en 1993, donde se empleó un hormigón con árido de arcilla expandida alcanzando  $55 \text{ N/mm}^2$  con densidad de  $1,9 \text{ kg/dm}^3$ .

- *Ligeros orgánicos*: Con agregados derivados de las maderas, como virutas y serrín, o cascarillas de arroz o maíz. Sin embargo, es necesario controlar los efectos negativos que ejerce en el fraguado el alto contenido de sustancias como glucosa, ácidos, resinas y otras sustancias orgánicas. La gran ventaja radica en la gran resistencia a la flexotracción que a veces puede llegar a igualar a la de compresión.
- *Con poliestireno expandido*, Reemplaza el uso de áridos para otorgar ligereza y aportar como aislante térmico a la mezcla, puede alcanzar  $25 \text{ N/mm}^2$  con densidades de entre  $1,1$  y  $1,5 \text{ kg/dm}^3$ . Sirve para ser utilizado como cerramiento aislante, o rellenos por ejemplo.
- *Hormigón autocompactante*, Nace en Japón en la década de 1980 con la aparición de los nuevos superplastificantes, específicamente fue desarrollado en la Universidad de Tokio en 1988. La gran diferencia es su gran fluidez, manteniendo coherencia que evita



la segregación de los componentes, no necesita vibrado, permite el relleno de estructuras estrechas y de formas complejas sin tener problemas en el paso por entre enfierraduras. No presentan coqueas y son bastante más impermeables que los hormigones tradicionales. Generalmente se utiliza en resistencias de entre 20 y 50 N/mm<sup>2</sup>, pudiendo ser superior si se requiere.

- *Hormigón bacteriano autorreparable*: Existen investigaciones en las que se está realizando la búsqueda de agregados para la mezcla de hormigón, que le permita “autorrepararse”, esto quiere decir, que tendría la capacidad de rellenar fisuras o grietas, esto significa una mantención constante para la estructura, lo que evitaría el avance de ataques generalmente provocados por agentes medio ambientales cuando se produce una fisura, como por ejemplo la penetración de cloruros que pueden llegar a corroer la armadura de acero dispuesta en el interior del hormigón armado. Se conocen investigaciones de la Universidad de Delf en los Países Bajos, donde la incorporación de una micro cápsula que contiene un tipo de bacteria específica, produce caliza al metabolizar como alimento el lactato de calcio que se introduce en la micro cápsula –gracias a la precipitación de otras reacciones químicas- y que se activa al presentarse una fisuración y entrar en contacto con el oxígeno. Esta innovación es creación

del equipo liderado por el Profesor Henk Jonkers. (Jonkers, 2012).



Autorreparación de fisura. (Jonkers H. , 2010)

- *Hormigón flexible autorreparable*, El equipo liderado por el Profesor Víctor Li, de la Universidad de Michigan, ha desarrollado un hormigón flexible, al que se le han agregado ciertas fibras especiales que le dan esta característica, la cual permite que en las estructuras ensayadas en laboratorio, logra una deformación hasta 5% más que su tamaño inicial sin fisurarse. Si esto ocurre, el fisuramiento es controlado y traducido es miles de pequeñas fisuras, que al tener un tamaño despreciable, podrá autorrepararse con el proceso generado naturalmente en la superficie del hormigón al entrar en contacto con el agua y el dióxido de carbono, creando una “cicatriz” de carbonato de calcio. En 5 ciclos de humedecimiento se estima que la grieta quedaría completamente cicatrizada. (Li, 2009)



Hormigón Flexible ensayado en laboratorio. [www.tendencias21.net](http://www.tendencias21.net)

Para finalizar esta revisión histórica de la tecnología del hormigón, podemos decir que es un recurso inagotable de investigación e innovación tecnológica, siendo además un material noble, accesible, moldeable y versátil estéticamente. Se habla que en el planeta tierra, lo que más se consume después del agua, es hormigón.

Esto lleva a plantear aspectos importantes que son base de este estudio, como la inspección, mantención y durabilidad del mismo. Las nuevas ideas de realizar hormigones autorreparables, si bien aún son investigaciones y no se ha llegado a una comercialización, parece ser el camino sustentable para un recurso que si bien es inagotable, contamina en su extracción y elaboración. Tal como en algún momento el hormigón se alió al acero para mejorar sus prestaciones a la flexión y hoy en día casi lo vemos como una sola cosa, por su gran compatibilidad y posibilidades, el paso que viene puede ser la alianza con otros compuestos como bacterias o fibras compuestas.

### 2.1.3. Definición técnica constructiva

Es necesario para este estudio definir la técnica constructiva en la que se basa, lo que hemos llamado y utilizado como “hormigón”, debido a que, como se explicó en el punto precedente, la tecnología del hormigón ha ido avanzando en la mejora de las dosificaciones buscando mejores prestaciones, hasta llegar a mezclas que, si bien siguen siendo llamadas hormigón, se alejan a la definición regular y no representan el enfoque de este estudio. Se hace referencia a hormigones que han reemplazado el uso del cemento por otro tipo de aglomerante polimérico o que en sus agregados existen partículas de tipo orgánica; estos cambios a la estructura intrínseca del hormigón, generan que la mayor parte de las investigaciones de métodos no destructivos de ensayos para este material queden en un campo completamente nuevo, abierto a la investigación.

Como ya se sabe, las características que más influyen en la composición y forma de respuesta del hormigón van desde la densidad, porosidad, tamaño del árido, humedad, temperatura, relación agua/cemento, etc. La resistencia mecánica esperada o especificada es la que da la pauta para las mezclas que serán usadas en estos hormigones, para poder entender cómo se relaciona esto con las diferentes partes que componen este material heterogéneo, describiremos la técnica constructiva típica, las diferencias que tiene un hormigón con un mortero de cemento y cuáles son las tecnologías utilizadas en la actualidad.

### **Hormigón:**

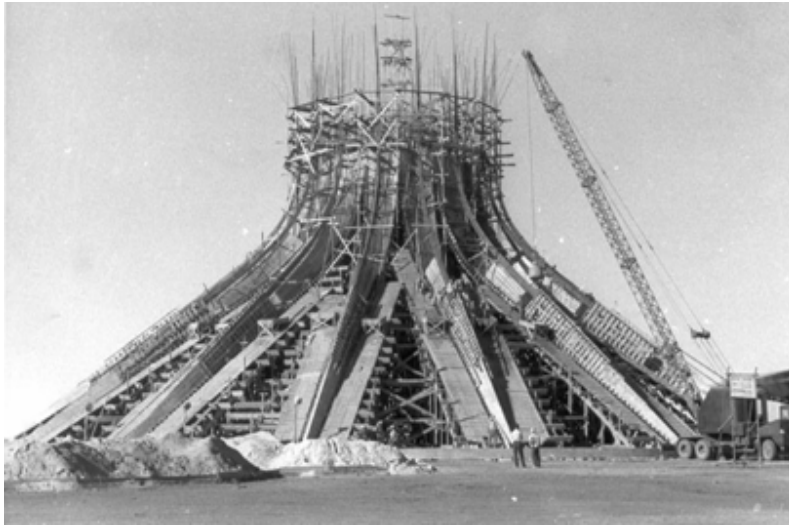
Como material estructural permite comportamientos a la compresión adecuados según lo que haya sido formulado, si sólo hablamos de la mezcla de áridos, cemento y agua; sin embargo, si se combina con armaduras de acero logrará trabajar con esfuerzos mixtos de compresión y tensión, lo que lo aventaja con respecto a otros materiales. Puede proyectarse para grandes prestaciones, resultando elementos de grandes dimensiones, las que de todas maneras, pueden ser disminuidas considerando la técnica del precomprimido. Resulta ser un recurso inagotable de opciones, al poseer características monolíticas, pero con facilidades de ser moldeado a gusto y tener un origen artificial y replicable.

Además podemos hablar de que el hormigón tiene mejores prestaciones frente a agentes físico – medio ambientales, como su alta resistencia al fuego en comparación con otros materiales de construcción como el acero o la madera. Además dependiendo de una buena ejecución y dosificación, puede llegar a ser un aceptable aislante acústico, y ser considerado impermeable al agua, igualmente en zonas con bastante oscilación térmica, aporta inercia térmica, muy apreciada en estos casos.

Al ser un material moldeable y modificable según requerimientos, permite su trabajo desde diferentes estrategias estructurales, tales como los tradicionales de tramas de esquemas dinámicos (pilares, vigas, pórticos, marcos, arcos, entramados estereométricos, placas, mixtos



con placas, nervados, etc.) Como también puede otorgar mayor versatilidad y trabajar con formas curvas y orgánicas. Como las realizadas en Brasilia por el Arquitecto Oscar Niemeyer.



Construcción de la Catedral de Brasilia, 1970.

Su función estructural y altas prestaciones exige la realización de cálculo estructural regido por normativas especiales en cada país, considerando factores climáticos, sísmicos, etc.

El hormigón al ser un material compuesto por otros, es denominado como un material heterogéneo, sin embargo, muchas veces hablamos de la homogeneidad del hormigón, esto quiere decir que cada parte de una estructura deberá

tener las mismas cantidades y relaciones entre cada uno de los compuesto que forman esta masa, según las proporciones con que fue diseñada la mezcla. De esta manera se puede asegurar un comportamiento monolítico de la estructura. Lograr esta característica dependerá de la correcta ejecución del proceso constructivo. Es natural que debido al transporte, vertido, al pasar por entre armaduras y durante el compactado, exista una segregación indeseable, el árido tendera a decantarse según su tamaño y densidad, esto se debe evitar con un correcto vibrado de la mezcla ya vertida en los encofrados.

#### Conceptos generales:

El hormigón es un conglomerado, es decir, un material que esta constituido por una mezcla de una materia base que entrega las propiedades generales y otra materia aglomerante que aporta coherencia a la mezcla. Esta relación se realiza bajo procesos químicos y físicos específicos, que consideran condiciones de humedad, presión y temperatura especiales.

El hormigón se compone por aglomerantes, áridos (finos y gruesos) en proporciones adecuadas. No se debe confundir esto con los morteros, los cuales no incluyen árido grueso, o con las pastas que solo son una mezcla de aglomerante y agua. (Guzman, 1992)

- *Aglomerantes*, Son aquellos materiales con la capacidad de entregar coherencia a la mezcla que forma un “conglomerado”. Estas sustancias pueden ser naturales o artificiales, derivadas de algún proceso químico; entre los que podemos mencionar como naturales la arcilla, el yeso, cal aérea, cal hidráulica, cementos en general, anhidrita, cenizas de lignito, puzolana, magnesia. Los artificiales más comunes son derivados de la química orgánica. La característica común que tienen todos es la función de aglomerar y estabilizar la mezcla, variara el tipo de fraguado, hidratación, adherencia, resistencia, etc. Para este estudio se ha tomado como referencia aquellos conglomerados formados en base a cemento Portland.
- *Cemento*, Se define como un aglomerante creado mediante la mezcla generada por la cocción de diferentes minerales con compuestos predominantes de cal y arcilla que producen un producto llamado “clinker” y la añadidura de otro aglomerante como el yeso (sulfato de calcio), o sus adiciones. Según la Norma RC-08 “Instrucción para la recepción de cemento”, se define como un material que es capaz de fraguar y endurecerse en contacto con el agua. La Norma UNE 80303-1:2001 (Normalización, Norma UNE 80303-1, 2001) clasifica los diferentes tipos de cemento según sus componentes en la siguiente tabla:

Tipo de cemento	Subtipo	Denominación	Designación	
CEM I	Sin subtipo	Cemento Portland	CEM I	
	A B	Cemento Portland con escoria de horno alto	CEM II/A-S CEM II/B-S	
CEM II	Sólo A	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	
	A B	Cemento Portland con puzolana natural	CEM II/A-P CEM II/B-P	
	A B	Cemento Portland con puzolana natural calcinada	CEM II/A-Q CEM II/B-Q	
	A B	Cemento Portland con ceniza volante silicea	CEM II/A-V CEM II/B-V	
	A B	Cemento Portland con ceniza volante calcárea	CEM II/A-W CEM II/B-W	
	A B	Cemento Portland con esquistos calcinados	CEM II/A-T CEM II/B-T	
	A B	Cemento Portland con caliza L	CEM II/A-L CEM II/B-L	
	A B	Cemento Portland con caliza LL	CEM II/A-LL CEM II/B-LL	
	A B	Cemento Portland mixto con todas las adiciones	CEM II/A-M CEM II/B-M	
	CEM III	A B C	Cemento con escoria de horno alto	CEM III/A CEM III/B CEM III/C
		A B	Cemento puzolánico con D, P, Q, V, W	CEM IV/A CEM IV/B
		A B	Cemento compuesto con S, P, Q, V	CEM V/A CEM V/B

*Cemento Portland*: Fue formulado en 1824 por José Aspdin. El nombre obedece a la similitud de color ya fraguado, con las piedras naturales de la localidad de Portland (Inglaterra). Está constituido por un conjunto de sustancias calcáreas y cementicias calcinadas más otras en menor porcentaje (todas estas cantidades establecidas por normas). Este cemento, considerado internacionalmente como el normal o convencional, se obtiene de la molienda conjunta del clínker y el yeso (este último hasta en un 32%).

El clínquer se compone habitualmente de: (Testa, 2008)

Cal	(CaO)	63,5
Sílice	(SiO <sub>2</sub> )	20,5%
Alúmina	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,5%
Oxido de hierro	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,0%
Magnesia	(MgO)	2,5%
Anhídrido sulfúrico	(SO <sub>3</sub> )	1,75%
Alcalis	(K <sub>2</sub> O) (Na <sub>2</sub> O)	0,65%
H <sub>2</sub> O y CO <sub>2</sub>		2,0%

Eventualmente pigmentos colorantes entre un 1% y un 5%.

El yeso mezclado con el clínquer hace la reacción menos violenta y más controlable. (Testa, 2008)

- *Agua*, Se puede decir que el agua es el segundo componente del hormigón ya que participa en la reacción química con el aglomerante y también cumple funciones plastificantes que permiten el correcto vertido del hormigón dentro de los encofrados, además participa en el proceso de curado, otorgando hidratación externa a la mezcla ya desencofrada. El agua que se utiliza debe ser limpia y encontrarse libre de impurezas, algunas impurezas como los cloruros, actúan generando eflorescencias en la superficie del elemento o provocando la corrosión de las armaduras de acero. Se consideran aguas dañinas para el hormigón las que contienen azúcares, taninos, materias orgánicas, aceites, sulfatos, ácido húmico, sales alcalinas, gas carbónico, y residuos industriales. La normativa española no permite aguas con Ph inferior a 5. El agua de mar está

especialmente prohibida para realizar el curado del hormigón armado, por su alto contenido de cloruros que pueden penetrar los poros del hormigón y desarrollar un proceso corrosivo.

- *Áridos*, Son materiales granulares inertes, de tamaño comprendió entre 0 y 100 mm, contribuyen a la estabilidad de volumen de las mezclas, no participan de la propiedad aglomerante dentro del material, aportan las propiedades mecánicas, como resistencia, retracción, fluencia, abrasión e incluso relacionado a la durabilidad, como también pueden aportar a la estética como color o textura. Ocupan cerca del 80% del volumen de la preparación siendo el resto el cemento y agua.

Para ser más específicos, al referirnos a áridos hablamos de arena y pétreos como chancado de rocas u otros obtenido de canteras o ríos. Se sabe que el árido con mayor responsabilidad en la composición de un hormigón es la arena, una arena limpia, uniforme y con una humedad conocida y estable permite una correcta mezcla.

Un hormigón no podrá tener mayor resistencia a la compresión que los áridos que lo forman, sin embargo, conocer la resistencia mecánica de un árido de manera aislada es muy difícil de determinar. Existiendo de todas maneras estudios de referencia que permiten conocer esta característica. Esta característica está dada por la forma, textura, limpieza superficial y absorción del árido;

normalmente se utilizan áridos con una resistencia a la compresión superior a 100 N/mm<sup>2</sup>.

Por lo general los hormigones tienen una resistencia a la compresión que va desde 20 a 60 N/mm<sup>2</sup>, por lo que estarían por debajo de la resistencia general de los áridos utilizados en construcción.

- *Aditivos*, Se les puede considerar como el cuarto componente del hormigón, Según J. Calleja “Son productos que añadidos al conglomerante, en el momento de su elaboración en las condiciones adecuadas, en la forma conveniente y en las dosis precisas, tienen como finalidad modificar en sentido positivo y con carácter de permanente las propiedades del conglomerado, o en s caso conferírselas para mejor comportamiento en todos o en algún aspecto ,tanto en estado fresco como una vez fraguado” (Fernandez Canovas, 2006) La lista de aditivos es amplia y variada, existiendo la siguiente clasificación:
  - Reductor de agua/Plastificante
  - reductor de agua/superplastificante
  - reductor de agua
  - incluso de aire
  - acelerador de fraguado
  - acelerador de endurecimiento
  - retardador de fraguado
  - hidrófugo de masa
  - multifuncional, etc.

### **Fabricación:**

La industria del hormigón se ha especializado, considerando tecnologías capaces de controlar los procesos de elaboración del hormigón y de esta forma conseguir dosificaciones idénticas a las especificadas por el cálculo estructural. Existen diversas formas de fabricar el hormigón, están son:

- *Dosificado, preparado y aplicado en obra*, la totalidad del proceso dependerá de factores humanos, se preparara por medios manuales, apoyados generalmente con maquinaria de poca envergadura como trompos carretilla tipo betonera. Sera un proceso muy poco controlado y es de altas probabilidades de derivar en defectos posteriores; además es de muy bajo rendimiento en términos de tiempos, costos y cantidades.
- *Predosificado*, la dosificación de los componentes del hormigón vendrá dada desde fábrica en sacos, los cuales deberán ser mezclados con el árido y ser hidratados para conseguir la mezcla. Si bien se asegura cierto control en la dosificación, dependerá del control de calidad en la faena, para asegurar un correcto amasado y añadidura de los demás componentes.
- *Premezclado*, dependiendo de la necesidad y envergadura de la obra, es bastante utilizada esta opción, asegurando controles de calidad desde la planta industrial donde se prepara el hormigón y luego

es trasladado en camiones betonera hasta la obra. Además son hormigones que vienen certificados desde los laboratorios de las fábricas, asegurando cumplir con las especificaciones detalladas para el proyecto. Es importante considerar el factor transporte y accesibilidad de los camiones a la obra para hacer efectiva esta tipología.

- *Prefabricado de armaduras*, además de asegurar la correcta dosificación y mezclado de los componentes del hormigón, es factible considerar la correcta ejecución de las armaduras de acero que irán dentro de la estructura, una opción es utilizar armaduras prefabricadas que lleguen listas a obra, evitando el armado in situ que muchas veces significa un acopio de material en lugares poco correctos y que pueden generar oxidaciones o torceduras previas al armado.
- *Prefabricado total*, Se confía completamente a la etapa industrial el control de las dosificaciones y armaduras, en obra se ejecuta el montaje. Los sistemas prefabricados de estructuras de hormigón son altamente utilizados para obras de ingeniería civil como puentes o pasarelas peatonales, también en arquitectura industrial, donde las grandes dimensiones dificulta y entorpece la realización tradicional del proceso, considerando encofrados, hormigonado, armado, desencofrado, etc. El uso de prefabricados para edificación de viviendas o proyectos de mediana escala también ha sido

desarrollado por diferentes empresas, cada una logrando especificar sistemas completos de prefabricados y juntas de montaje hechas en obra, generalmente húmedas o combinadas con pletinas metálicas preparadas para ser soldadas en obra.

Sin embargo, si bien la prefabricación asegura un control de calidad y terminaciones con especiales características, será muy importante considerar la logística asociada a este montaje, ya que necesitará grúas de montaje, accesibilidad para el transporte de las piezas. Además la fabricación de hormigonado en obra, permite la creación de formas mucho más libres que las que se ofrecen en la industria del prefabricado.



Montaje del sistema BSCP, Edificio de viviendas en Granollers, Barcelona.  
(Documentación MUTA)

### Dosificación:

Dosificar un hormigón, quiere decir, buscar las proporciones en que hay que mezclar los diferentes componentes que lo componen para lograr características específicas como consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, etc. Estas proporciones dan las cantidades de cemento a emplear, con relación al tamaño de los áridos y la proporción de agua requerida.

Como requisito general, una estructura deberá llegar al fin de su vida útil con las características mecánicas deseadas sin perjuicio del ambiente agresivo en el que se encuentre por lo que el cálculo de las dosificaciones tendrá en cuenta este tipo de factores que podrían alterarlo durante su uso.

Los factores para un proceso de dosificación son los siguientes: (Testa, 2008)

- Datos generales, corresponden a la caracterización de la problemática a abordar, y de su contexto:
  - Tipo de elemento a hormigonar (por ej: pilar, cimiento, losa, radier).
  - Dimensiones de dicho elemento.
  - Existencia o no de armadura o enfierradura.
  - Resistencia a la compresión requerida a los 28 días (R28) en [Kg/cm<sup>2</sup>]
  - Características del clima y del terreno (suave, agresivo, corrosivo, húmedo, seco).
  - Método de consolidación o compactación a utilizar.

-Tipo de cemento a utilizar (corriente, o de alta resistencia), (Portland, o especial).

- *Datos de laboratorio*, corresponden a las propiedades físicas y dimensionales de los áridos a utilizar:
  - Tamaño: módulo de fineza arena y diámetro máximo ripio.
  - Porcentaje de huecos entre granos tanto para árido fino como grueso.
  - Densidad aparente en [Kg/m<sup>3</sup>] para los dos tipos de áridos.
- *Datos de obra*, Corresponden a las variaciones producidas por la diferente absorción de agua por parte de los áridos según condiciones climáticas:
  - Cantidad de agua absorbida en arenas y en ripios, en % del peso.
  - Esponjamiento de las arenas en porcentaje del volumen aparente.
- *Planteamientos base para el cálculo*, Se considera como unidad volumétrica base de referencia 1 [m<sup>3</sup>] de hormigón. La fórmula fundamental es, por lo tanto:

$$\text{Volumen neto arena} + \text{Volumen neto ripio} + \text{Agua} + \text{Volumen neto cemento} + \text{aire} = 1[\text{m}^3]$$

En España los valores de resistencia se tipifican regularmente de la siguiente manera:

20-25-30-35-40-45-50 N/mm<sup>2</sup>

Los hormigones que tienen una resistencia superior a los 50 N/mm<sup>2</sup>, son considerados como hormigones de alta resistencia.

Finalmente, se puede entender que existirán diversos factores que darán como resultado final un hormigón óptimo, tal y como fue diseñado para la obra en específico. Un hormigón mal ejecutado puede echar por tierra todo cálculo estructural bien realizado, esto puede provocar que la agresividad del medio ambiente en que se encuentre la estructura de hormigón, encuentre debilidades donde alojarse, generando patologías constructivas a tempranas edades, lo que comprometerá la integridad y la vida útil esperada.

#### **2.1.4. Patologías del hormigón**

Ya hemos explicado anteriormente a que nos referimos con un estudio patológico. El estudio será la primera aproximación del arquitecto para reconocer las anomalías, fallos o lesiones que tiene una estructura, este deberá decidir las medidas más apropiadas para la reparación y de esta manera anular el proceso patológico. Las anomalías pueden ser denominadas como los indicios evidentes de un posible fallo, a su vez, los fallos son aquellos que suceden cuando un elemento

estructural pierde la capacidad de desempeñar la función para la que fue diseñado, en cambio una lesión se distingue como distintas manifestaciones que pueden mostrarse debido a un problema constructivo del hormigón. Existen estudios que hablan de que estadísticamente los fallos en el proceso de construcción se deben en un 43% a la etapa de Proyecto, un 28% a la ejecución, 14% a los materiales empleados, un 10% debido al uso y el 5% restante al ítem de “varios”. Esto indica claramente que la responsabilidad recae principalmente en los profesionales a cargo de un proyecto, los cuales deben tener los conocimientos necesarios para diseñar correctamente y ejecutar en consideración a las condicionantes de cada obra.

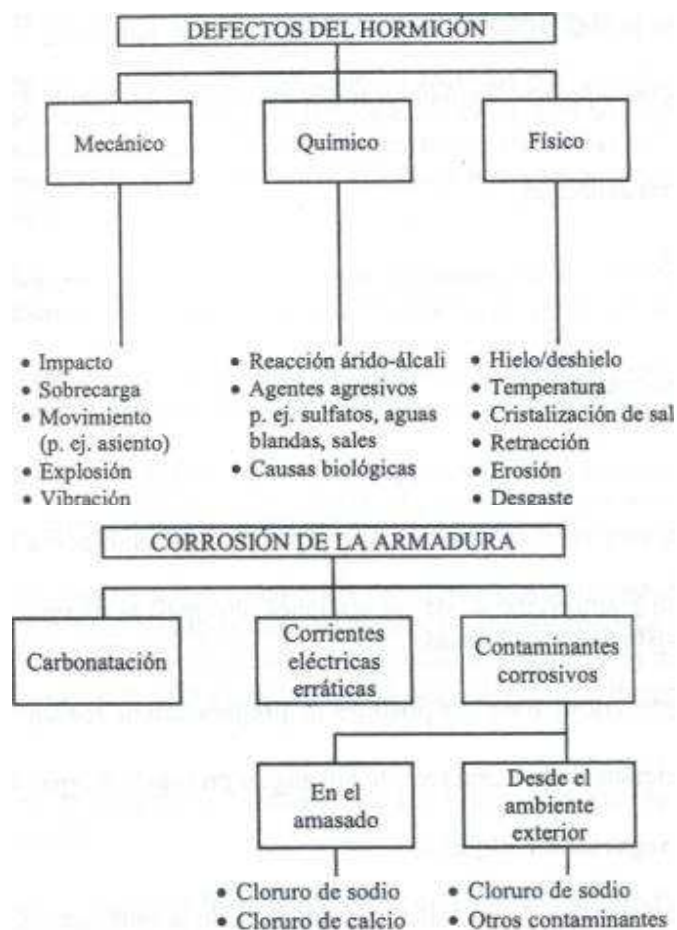
Pueden ser clasificadas como: (Broto, 2005)

- Físicas, como humedades, erosión, suciedad.
- Mecánicas, por ejemplo, deformaciones, grietas, fisuras, desprendimiento, erosión mecánica, estrés mecánico.
- Químicas, tales como, eflorescencias, oxidación, corrosión, provocada por organismos, erosión química.

Otras también pueden ser provocadas por una reparación deficiente que puede conllevar peores insuficiencias que las iniciales con el paso del tiempo.



Una lesión puede contener más de un tipo de defecto al mismo tiempo, estas pueden ser directas o indirectas y generalmente se encuentran combinadas, lo que la toma de decisiones para una reparación, es siempre abarcando una amplia gama de factores. La Norma UNE 1504-9 divide en dos áreas los defectos que puede presentar un hormigón. (Normalización, NORMA UNE 1504, 2005)



Para el enfoque de este estudio explicaremos las lesiones comúnmente encontradas y que se relacionarán directamente a los ensayos no destructivos que se han realizado, estos son aquellos que tienen un rango de acción superficial o subsuperficial y que se encuentran muchas veces dentro del rango visible, se omitirán otras poco relevantes:

### Fisuración

Se puede definir como una rotura en la masa de hormigón que se manifiesta exteriormente con un desarrollo lineal en la superficie de la estructura, puede ocurrir en elementos estructurales o en otros no estructurales como cerramientos, es una manifestación no deseada e incontrolable. Es uno de los inconvenientes como consecuencia a su baja resistencia a la tracción, pueden presentarse luego de algunas horas, semanas, meses, incluso años. (Fernandez Canovas, 2006).

Se producirá cuando la tensión generada por la tracción que afecta al elemento, sobrepasa su resistencia última, mostrándose como una rotura. Es la evidencia de un defecto grave o de una mala respuesta en la edificación.

Podríamos hacer una diferenciación entre una fisura o una grieta, la grieta siempre supondrá un compromiso estructural al tener una dimensión mayor que la fisura y generalmente estará asociada a una falla producida por un gran esfuerzo mecánico que no fue soportado por la estructura. Además las fisuras son una voz de alarma para el observador, y un deterioro estético de la obra, estas pueden mantenerse en



estado “vivo” siempre que el movimiento de las relaciones intrínsecas del hormigón continúen siendo separadas por esta tensión que las provoca, o denominarse en estado “muerto” cuando ya la tensión a terminado o el hormigón se ha asentado finalmente en una rotura de un espesor determinado y no seguirá rompiéndose.

Pueden clasificarse según su amplitud, (Broto, 2005)

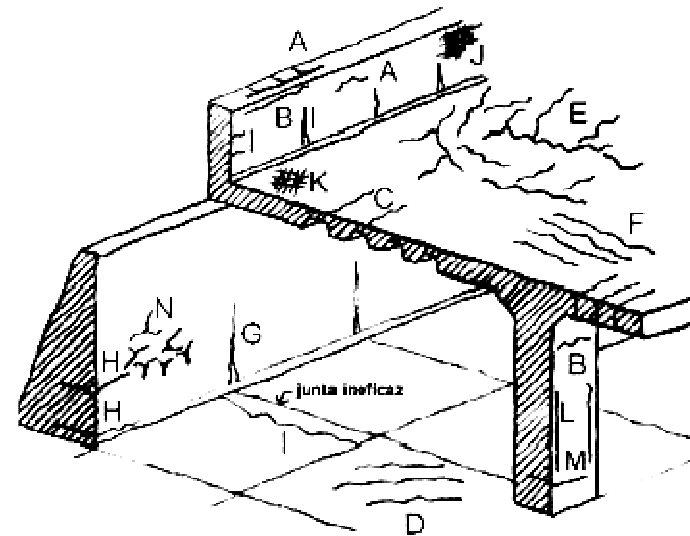
-*Microfisuras*, aberturas muy pequeñas que no resultan visibles.

-*Fisuras*, Aberturas que en general tienen una anchura inferior al milímetro, afectan a la superficie del material solamente.

-*Grietas*, Son aquellas de más de un milímetro de ancho que afectan a todo el espesor del material o del elemento constructivo, provocan problemas en su consistencia e integridad.

La causa de estas fisuras puede tener diferentes orígenes, pueden ser por características intrínsecas del material como el asentamiento plástico o retracción plástica, por una contracción térmica inicial, retracción hidráulica, afogado, contracción térmica inicial, etc. Se producen en su estado plástico o luego de su endurecimiento, generalmente no son consideradas como estructurales. Las que si son de importancia estructural son debido a la corrosión de las armaduras o las excesivas tensiones de tracción o compresión debido a deformaciones externas y solicitaciones puntuales.

A-B-C	Asentamiento plástico
D-E-F	Retracción térmica
G-H	Contracción térmica temprana
I	Retracción de secado a largo plazo
J-K	afogado
L-M	Corrosión de armaduras
N	Reacción árido - alcalis



(Estevez, 2013)

CAUSA	TIEMPO	MANIFESTACIÓN	OBSERVACIONES
<b>Asentamiento plástico.</b>	A las pocas horas del hormigonado.	Fisuras coincidiendo con las barras de armado. Las fisuras pueden cambiar de acuerdo con la forma de la sección.	Pueden aparecer fisuras de grandes dimensiones.
<b>Retracción plástica.</b>	A las pocas horas del hormigonado.	Mapa de fisuras (afogado) o fisuras largas en la superficie, puestas en obra en condiciones de ambiente seco o vientos.	Fisuras que pueden alcanzar de 2 a 4 mm de ancho.
<b>Fisuras de origen térmico a corta edad.</b>	A los primeros días de la puesta en obra.	Fisuras importantes en muros y piezas de gran longitud.	Pueden limitarse por las armaduras, limitando el tamaño de las piezas y controlando la temperatura.
<b>Retracción hidráulica.</b>	Después de varios meses de la puesta en obra.	Fisuras de forma similar a las de tracción o flexión.	Si el hormigón es armado suelen ser de pequeña anchura y separadas.
<b>Corrosión.</b>	Después de varios años de finalizada la construcción.	Fisuras siguiendo las líneas de las barras principales y de los estribos. Desintegración del hormigón.	Inicialmente pequeñas incrementándose con el tiempo. El óxido puede ser visible en condiciones húmedas.

<b>Reacción álcali-árido</b>	Después de varios años de finalizada la construcción.	Tienen lugar en condiciones de humedad apareciendo en forma de "espuelas de gaucho". Solo ocurren con áridos reactivos.	Las fisuras pueden ser grandes.
<b>Cargas de servicio.</b>	Después del uso de la estructura.	Pueden ser de flexión tracción, cortante, torsión, etc.	Son pequeñas si el proyecto es adecuado. Si son grandes son índice de un mal dimensionamiento de la estructura o poca calidad.

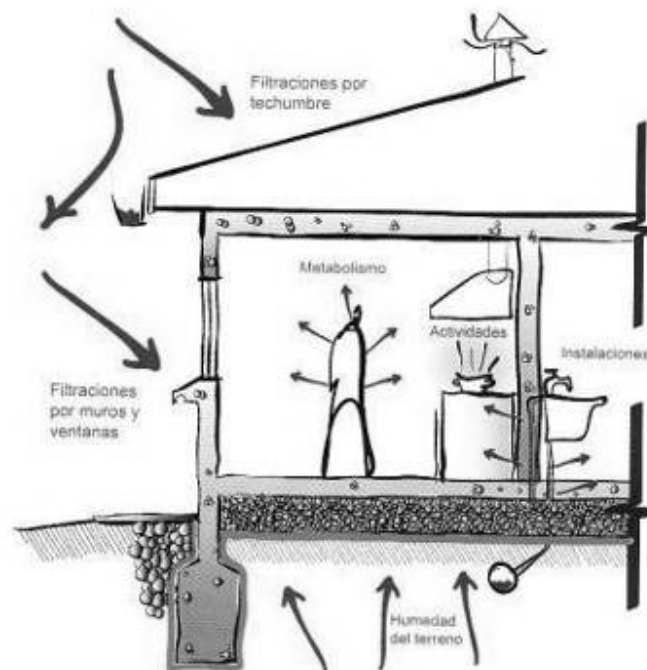
(Fernandez Canovas, 2006)

## Humedad

Pueden ser clasificadas de 5 formas diferentes, la *humedad de obra* generada durante el proceso constructivo, *humedad capilar* que es aquella que procede del suelo y asciende por los elementos verticales, la *humedad de filtración* esta proviene desde el exterior y penetra al edificio por su envolvente, la *humedad de condensación* generada en el interior de las edificaciones por el vapor de agua acumulado durante las jornadas diarias y la *humedad accidental*, producida por ejemplo por roturas de cañerías. Las humedades por filtración son generalmente provocadas por lluvias, esto puede producir mayores defectos si es el caso de presentarse lluvias acidas, ya que se puede alcanzar un pH 4 pudiendo formar ácido sulfúrico y atacar directamente al hormigón. (Broto, 2005)

Dependerá de la permeabilidad de la edificación, considerando la porosidad que tiene y la relación entre estos, como también de las condiciones de emplazamiento y control de ejecución de la obra.

En el hormigón armado afectará directamente a las enfierraduras, provocando su corrosión y consiguiente rotura del recubrimiento de hormigón que las protege de la agresividad del medio.



(Testa, 2008)

Otro caso que puede presentarse debido a la humedad es la generación de eflorescencias, que son sales cristalizadas que asoman a la superficie del hormigón, además se pueden generar microorganismos como hongos, que van ocupando los poros del hormigón y generando presión hasta provocar desprendimientos sumados al debilitamiento de la superficie. La humedad puede evidenciarse debido al cambio de coloración de la superficie del hormigón, y a la vez puede ser palpable, por lo que su detección es evidente.

## Coqueras

Se pueden describir como burbujas de aire que quedan debido a un mal proceso de vaciado y vibrado del hormigón al momento de su ejecución, esto producirá que una vez fraguado, queden como pequeños huecos en la masa endurecida. Pueden ser superficiales o internas, de pequeñas, medianas o grandes dimensiones. Generalmente no producen problemas estructurales, a no ser que sean de tamaño considerable y afecten la cohesión del total. De todas maneras un hormigón que presente gran cantidad de coqueras superficiales se presenta como un hormigón de gran porosidad, lo que puede permitir el ingreso de humedad y cloruros que afecten la estructura de acero interior.



Superficie porosa, Espécimen a analizar, edificio CRITT, ETSAV.

## Carbonatación

Más adelante se desarrollará en profundidad lo que es la carbonatación y como esta afecta la resistencia del hormigón. De manera general podemos decir que este va perdiendo su alcalinidad al estar expuesto y reaccionando constantemente con el  $\text{CO}_2$  del ambiente, se considera que esta situación es peligrosa para las armaduras cuando el Ph es menor a 9,5, pudiendo afectar la integridad de las armaduras y comenzar un proceso de corrosión en estas. Sin embargo, un hormigón de cemento portland sin armar no necesariamente presentará anomalías ya que la carbonatación produce un cerramiento de los poros, endureciendo además la superficie de este.

## Delaminación

Es el aumento de volumen en la zona subsuperficial, produciendo una pérdida de cohesión y adherencia que produce una rotura en la capa exterior.

Puede ser provocada por el aumento de sección de las armaduras al oxidarse o también por procesos de hielo y deshielo, el agua al congelarse aumenta aproximadamente en un 9% su volumen, si un hormigón es bastante poroso, su contenido de agua libre será considerable, lo que provoca tensiones internas entre las partículas cohesionadas de la pasta de cemento, por tanto existirá un movimiento inesperado y constante que romperá la superficie. Se muestra como zonas erosionadas y de textura diferente a la superficie general del elemento.

### **Abrasión**

Es un proceso gradual debido a la fricción que puede generar el uso constante de las superficies de hormigón, produciendo un desgaste que va separando las partículas que componen esta superficie. La abrasión hace decrecer el espesor del recubrimiento superficial que caracteriza al hormigón armado para protección de las armaduras de acero, lo que en consecuencia permite una mayor incidencia de las acciones agresivas del entorno.

### **Lixiviación**

Durante el constante paso de agua, especialmente de agua pura, sobre la superficie del hormigón, esta puede generar un proceso de lavado del calcio que contiene la pasta de cemento, lo que finalmente provoca el desmoronamiento de sistema que mantiene cohesionada la mezcla ya endurecida. Provoca además un aumento en la porosidad de la superficie y por tanto su permeabilidad. Reduce la resistencia y agiliza los procesos de deterioro ya que genera una pérdida de masa constante que va debilitando paulatinamente el concreto.

### **Acción del Fuego**

La acción del fuego provoca una dilatación de las partículas que componen tanto el hormigón como el acero de las armaduras, lo que va generando una pérdida de resistencia mecánica, a la compresión y a la tracción, dependiendo de la dosificación específica, la acción del fuego será más o menos dañina y evolucionara con distinta intensidad, dando lugar a

tensiones internas que disgregaran a hormigón, sin embargo, puede hacerse una clasificación de las acciones del fuego según las temperaturas que afectan a la estructura: (Broto, 2005) (Fernandez Canovas, 2006)

-A partir de los 100°C, aun no hay peligro, ya que el agua capilar incluida en la masa del hormigón comienza a evaporarse y a retardar el calentamiento, sin generar compromiso estructural. Hasta los 300°C, el agua capilar ya se ha evaporado completamente, de todas maneras aun no se aprecian alteraciones en a estructura del cemento hidratado y no existiría una disminución relevante de la resistencia.

-Entre 300°C y los 600°C, el hormigón toma un tono rosáceo. En este momento puede perder un 60% de resistencia y hasta un 75% de la resistencia total durante el enfriamiento.

- Entre 600°C y los 900°C, el hormigón toma un color gris claro. Se va tornando bastante más poroso y pierde entre el 60% y el 90% de la resistencia, aumentando durante el enfriamiento.

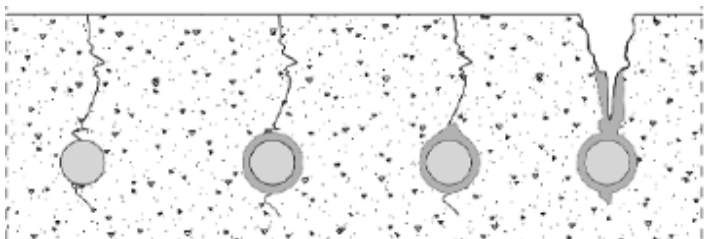
- Mayor a 900°C, la tonalidad del hormigón varía de blanco a amarillo, en este momento la resistencia del hormigón se pierde completamente.

De todas maneras según las normativas en especial la Norma EHE-08 en España, ya alcanzada una temperatura de 500°C, se considera como un elemento sin resistencia estructural por seguridad. (Ministerio de Fomento, 2008)

## Corrosión de las Armaduras

Se produce por un proceso electroquímico o galvánico, la presencia de la humedad, oxígeno, agua y cloruros, crean una reacción acelerada donde se genera una pila galvánica que además asociada a una pérdida de Ph por procesos de carbonatación, o penetración de iones de cloro, dan el ambiente propicio para la corrosión. (Fernandez Canovas, 2006)

La humedad penetra por las fisuras y por los poros, luego se inicia la formación del óxido alrededor de las armaduras, formando productos de corrosión voluminosos que producen tensiones expansivas en el interior de la estructura de hormigón, finalmente la presión interna produce desprendimiento de porciones de hormigón y las barras de acero quedan expuestas al aire, aumentando la acción corrosiva del ambiente.



(Broto, 2005)

## 2.1.5. Normativas para reparaciones en el hormigón.

El estudio Patológico tiene como fin realizar un detallado análisis de la patología constructiva que puede presentar un elemento, describir sus lesiones, fallos o anomalías presentes, para luego proponer un plan de acción que puede incluir desde la reparación, la restauración, rehabilitación o un procedimiento de mantenimiento y prevención, que permita extender la vida útil de la estructura.

En España la reparación de las estructuras de hormigón está normada por la Norma UNE 1504, a su vez existe la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08, que define el marco reglamentario donde establece las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y contra incendio. Además la normativa también abarca algunos de los métodos no destructivos utilizados para este estudio, siendo la Norma UNE-12504-2 relativa a la determinación del índice de rebote y la UNE EN12504-4, a la velocidad de propagación de ultrasonidos, aclarando la importancia de combinarlos con ensayos en laboratorio realizados en testigos extraídos desde las estructuras.

En este apartado revisaremos los antecedentes de las reparaciones ajustados según la Norma UNE 1504, ya que permite hacer una clasificación de aquellas lesiones que pueden ser reparadas y como debería hacerse. El conocimiento de este punto de vista ayudara al profesional a analizar la estructura bajo estas líneas, lo que permitirán

realizar un adecuado estudio de las lesiones y por ende, la planificación de las reparaciones.

La Norma UNE 1504, además de definir y especificar los productos y sistemas que pueden ser utilizados para reparaciones en hormigón estructural, va clasificándolos dentro de su campo de acción, como por ejemplo los métodos de protección superficial, tales como la impregnación o los revestimientos, registra la diferencia entre una reparación estructural y una no estructural, incluyendo morteros y hormigones de reparación que son utilizados muchas veces para restituir o sustituir hormigón defectuoso o para proteger la armadura de acero dispuesta en su interior, con tal de aumentar la vida de servicio de un elemento que presente deterioros.

Incluye especificaciones sobre tipos de adhesiones estructurales entre hormigones frescos, endurecidos o placas exteriores, caracteriza las opciones de inyecciones que pueden realizarse al hormigón, con diferentes motivos, como por ejemplo para protección contra la penetración, relleno de fisuras, refuerzo estructural o para conseguir impermeabilización como también los métodos de ensayo para cada tipología de reparación.

Explica las prestaciones, seguridad y durabilidad de los sistemas utilizados para el anclaje de armaduras de acero, que pueden ser utilizadas como refuerzo estructural con el fin de asegurar la continuidad de las estructuras de hormigón armado; al mismo tiempo cuales son los productos y sistemas

para la protección de la corrosión del acero, tales como revestimientos activos, revestimientos tipo barrera, así también la forma de evaluar y ensayar cada intervención. Por último da las pautas para la utilización de los productos in situ y el control de calidad que debe tener cada intervención, con el fin de una correcta utilización de los productos y sistemas disponibles en el mercado y la ciencia. Entrega un resumen práctico de los métodos que pueden ser utilizados, en base a los principios que definen los defectos posibles de encontrar en una estructura de hormigón armado; a continuación se anexan las tablas de referencia (UNE 1504-9)

Tabla 2  
Principios y Métodos relativos a la corrosión de la armadura

Principio n°	Principio y su definición	Algunos ejemplos de métodos basados en el principio
Principio 7 [RP]	<p>Conservación o restauración del pasivado</p> <p>Creación de las condiciones químicas en las que la superficie de la armadura se mantenga o retorne a las condiciones de pasivado.</p>	<p>7.1 Incremento del recubrimiento de la armadura con mortero de cemento u hormigón adicional</p> <p>7.2 Reemplazo del hormigón contaminado o carbonatado</p> <p>7.3 Realkalinización electroquímica del hormigón carbonatado<sup>1)</sup></p> <p>7.4 Realkalinización del hormigón carbonatado por difusión</p> <p>7.5 Extracción electroquímica de los iones cloruro<sup>1)</sup></p>
Principio 8 [IR]	<p>Incremento de la resistividad</p> <p>Incremento de la resistividad eléctrica del hormigón.</p>	8.1 Limitación del contenido de humedad por tratamientos superficiales, revestimientos o protecciones
Principio 9 [CC]	<p>Control catódico</p> <p>Creación de las condiciones para que las áreas potencialmente catódicas de la armadura hagan imposible alcanzar una reacción anódica.</p>	9.1 Limitación del contenido en oxígeno (en el cátodo) por saturación o revestimiento superficial <sup>2)</sup>
Principio 10 [CP]	Protección catódica	10.1 Aplicación de un potencial eléctrico <sup>1)</sup>
Principio 11 [CA]	<p>Control de las áreas anódicas</p> <p>Creación de condiciones para que las áreas potencialmente anódicas de la armadura hagan imposible una reacción de corrosión.</p>	<p>11.1 Pintado de la armadura con revestimientos que contengan pigmentos activos</p> <p>11.2 Pintado de la armadura con revestimientos barrera</p> <p>11.3 Aplicación de inhibidores al hormigón<sup>1)</sup></p>

1) Estos métodos pueden hacer uso de productos y sistemas no incluidos en la serie de Normas UN 1504.

2) La inclusión de métodos en esta norma experimental no implica su aprobación.



Tabla 1  
Principios y Métodos relativos a los defectos del hormigón

Principio nº	Principio y su definición	Métodos basados en el principio
Principio 1 [PI]	<b>Protección contra la penetración</b> Reducción o prevención de la entrada de agentes adversos, como el agua, otros líquidos, vapor, gas, agentes químicos y biológicos.	1.1 Impregnación Aplicación de productos líquidos que penetran en el hormigón y obstruyen el sistema de poros. 1.2 Revestimiento superficial con, o sin, capacidad de puentes de fisuras 1.3 Fisuras con vendaje local <sup>1)</sup> 1.4 Relleno de fisuras 1.5 Continuidad de las fisuras a través de las juntas <sup>1)</sup> 1.6 Levantamiento de paneles exteriores <sup>1)</sup> 1.7 Aplicación de membranas <sup>1)</sup>
Principio 2 [MC]	<b>Control de humedad</b> Ajuste y mantenimiento del contenido de humedad en el hormigón dentro de un intervalo de valores especificado.	2.1 Impregnación hidrófoba (hidrorrepelente) 2.2 Revestimiento superficial 2.3 Protección o sobrerrevestimiento <sup>1)</sup> 2.4 Tratamiento electroquímico <sup>1)</sup> Aplicación de una diferencia de potencial entre partes del hormigón para ayudar o evitar el paso del agua a través del hormigón. (No para el hormigón armado sin evaluación del riesgo de inducción a la corrosión).
Principio 3 [CR]	<b>Restauración del hormigón</b> Restauración del hormigón original de un elemento de la estructura a la forma y función especificada originalmente. Restauración de la estructura de hormigón por sustitución parcial.	3.1 Aplicación de mortero a mano 3.2 Relleno con hormigón 3.3 Proyección de hormigón o mortero 3.4 Reemplazo de elementos
Principio 4 [SS]	<b>Refuerzo estructural</b> Incremento o restauración de la capacidad portante de un elemento de la estructura de hormigón.	4.1 Adición o reposición de las barras de acero estructural embebidas o exteriores 4.2 Instalación de barras de unión en agujeros prefabricados u horadados en el hormigón 4.3 Adhesión de chapas 4.4 Adición de hormigón o mortero 4.5 Inyección de fisuras, huecos e intersticios 4.6 Relleno de fisuras, huecos e intersticios 4.7 Pretensado - (post-tensado) <sup>1)</sup>
Principio 5 [PR]	<b>Resistencia al ataque físico</b> Incremento de la resistencia al ataque físico o mecánico.	5.1 Capas o revestimientos 5.2 Impregnación
Principio 6 [RC]	<b>Resistencia a los productos químicos</b> Incremento de la resistencia de la superficie del hormigón al deterioro por ataque químico.	6.1 Capas o revestimientos 6.2 Impregnación

1) Estos métodos pueden hacer uso de productos y sistemas no cubiertos por la serie de Normas EN 1504.  
2) La inclusión de los métodos en esta norma experimental no implica su aprobación.

(Normalización, NORMA UNE 1504, 2005)

Para los alcances de este estudio, si bien, no se abarcará el plan de reparaciones necesarias, es importante conocer el marco normativo no solo para ampliar los conocimientos relativos al tema, sino que también para abrir la posibilidad de una continuación futura a esta investigación. Como ya se ha dicho, es un proceso, por lo que en esta tesina se conocen las técnicas de inspección no destructivas para conocer el estado de un espécimen de hormigón, en una próxima etapa se pretende dar inicio a la siguiente fase.



## 2.2. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### 2.2.1. Detección Visual

La detección visual, será fundamental para obtener un buen reconocimiento previo de las lesiones y del estado del espécimen para desde ahí comenzar a tomar decisiones y aplicar otras técnicas de medición más sofisticadas.

Es la primera fase del estudio patológico, se realiza generalmente mediante observaciones que pueden ser permanentes o periódicas, de manera de poder indicar sus características organolépticas realizando aquellas descripciones físicas que sean utilizadas para evaluar inicialmente. Pueden orientarnos sobre el nivel de daño y deterioro de las estructuras, además de deducir desde el estado actual, los procesos patológicos existentes gracias a las lesiones evidentes reconocibles a simple vista.

Esta fase puede dividirse en 3: (Broto, 2005)

1. Detectar las lesiones, su ubicación, materiales afectados, etc.
2. Identificar de que se trata, lesión originada por diseño, por construcción o por el periodo que lleva en funcionamiento.
3. Aislar y clasificar desde una primera impresión las lesiones.

Estos procedimientos se hacen paralelamente al estudio básico y preliminar del edificio, donde se reunirá la información existente, como planos, años de construido, usos que ha albergado, materialidades, mantención y conservación que se le ha realizado al inmueble, etc. estos datos serán relevantes para aproximar primeras conclusiones dentro de la inspección visual.

La inspección visual se complementará con una toma de los datos físicos como medidas y fotografías de las lesiones que serán objeto de análisis más detallados a posterior, por otra parte, las conclusiones a simple vista estarán fuertemente relacionadas a la experiencia del observador y al conocimiento y estudio previo que este maneje de las posibles anomalías que va a observar, por ultimo además se podrá definir la necesidad de registrar un seguimiento visual de las éstas en el tiempo.

Realizar este procedimiento de la manera más metódica posible servirá de gran ayuda para definir las conclusiones primarias, se aconseja generar clasificaciones de ciertos tipos de daños probables a encontrar y delimitar grados cuantitativos y cualitativos de estos previamente.

### 2.2.2. Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica del hormigón se define como la habilidad de resistir al traspaso de la electricidad, es el grado de dificultad que encuentran los electrones en su desplazamiento dentro de la masa del material, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es; por lo tanto la resistividad eléctrica es la característica inversa a la conductividad eléctrica.

El hormigón es un material heterogéneo y poroso, en gran medida su resistividad se verá afectada por el grado de saturación de los poros, el tipo de cemento, la hidratación de la pasta, la relación agua/cemento, etc. Un hormigón de baja porosidad, tendrá una mayor resistividad eléctrica y a su vez una mayor resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. También se puede decir que si la resistividad es baja, tiene relación con el nivel de saturación alto que tiene el hormigón y viceversa, por lo que es un buen indicador para saber el grado de saturación de la estructura.

Este índice se relaciona directamente con la facilidad de penetración de los cloruros que tendrían sobre la estructura, a su vez, la penetración de cloruros es la principal razón de la corrosión de las armaduras de acero que se encuentran en el interior del hormigón armado. Por lo tanto una alta resistividad eléctrica del hormigón indica una baja posibilidad y velocidad de corrosión de sus armaduras de acero y viceversa. Evaluar y detectar a

tiempo el nivel de riesgo o de afectación de las estructuras a la corrosión, será determinante para asegurar una buena mantención y vida útil al hormigón.

A pesar de que no hay un acuerdo concreto entre todos los autores sobre los valores de probabilidad y de la velocidad de corrosión según los índices de resistividad eléctrica, se presentan a continuación las clasificaciones encontradas: (Gonzalez, 2011)

FUENTE	RESISTIVIDAD	CLASIFICACION DE LA COROSION
<b>Vassie</b>	> 12 kΩcm	Corrosión poco probable
	5 a 12 kΩcm	Corrosión probable
	<5 kΩcm	Corrosión casi segura
<b>Polder</b>	>100 kΩcm	Riesgo de corrosión despreciable
	50 a 100 kΩcm	Riesgo de corrosión bajo
	10 a 50 kΩcm	Riesgo de corrosión moderado
	<10 kΩcm	Riesgo de corrosión alto
<b>Rodriguez et al</b>	>100 kΩcm	Velocidad de corrosión muy lenta incluso con hormigón carbonatado o contaminado por cloruros
	50 a 100 kΩcm	Velocidad de corrosión lenta
	10 a 50 kΩcm	Corrosión de moderada a alta cuando el acero este activo
	<10 kΩcm	La resistividad no controla la velocidad de corrosión
<b>Schiessel and Raupach</b>	>20 kΩcm	Velocidad de corrosión lenta
	10 a 20 kΩcm	Velocidad de corrosión moderada/lenta
	5 a 10 kΩcm	Velocidad de corrosión alta
	<5 kΩcm	Velocidad de corrosión muy alta
<b>CEB-192</b>	>20 kΩcm	Velocidad de corrosión despreciable
	10 a 20 kΩcm	Velocidad de corrosión bajo
	5 a 10 kΩcm	Velocidad de corrosión alto
	<5 kΩcm	Velocidad de corrosión muy alto

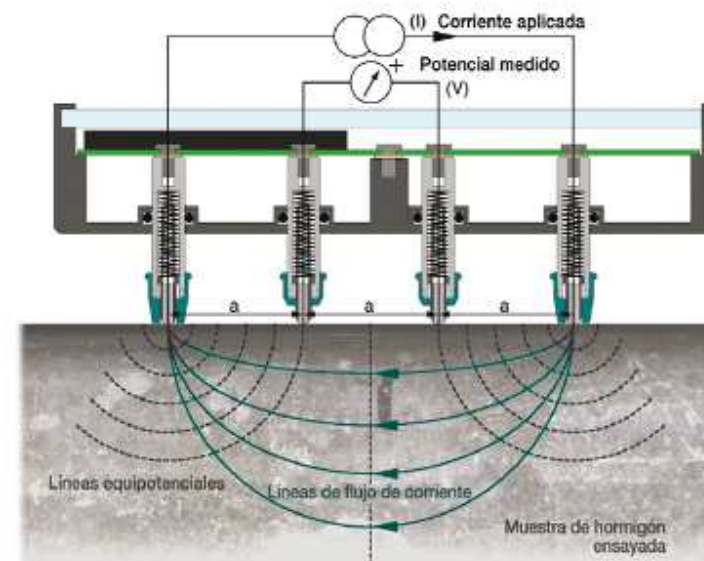
Como conclusión general a los valores entregados en la tabla anterior, se puede expresar que el acero parece alcanzar un estado activo de corrosión cuando la resistividad es menor que 10 [kΩcm], y un comportamiento pasivo cuando la resistividad es mayor que 30 [kΩcm]

Se puede entender que estos valores serán entregados por equipos especializados que deben ser manejados según criterios especiales y procedimientos entregados por los proveedores. De todas formas constituye uno de los métodos más rápidos, confiables y económicos que además no deterioran la estructura. Es una prueba de alta calidad que puede garantizar resultados confiables a pie de obra.

La medición de la resistividad eléctrica está basada en el principio de la sonda de Wenner, donde se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores y que además debe tener un buen contacto con la superficie del hormigón, dada por la humectación de esta mediante la aplicación de algún líquido (generalmente agua).

La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas, está calculada según la fórmula “Resistividad  $\rho = 2\pi aV/I$  [kΩcm]” (Proceq, Manual de operación Ensayos de durabilidad de hormigón)

En la imagen a continuación se muestra el esquema de la sonda de Wenner aplicado a una superficie de hormigón, los equipos modernos para la aplicación de esta técnica, tienen incorporados visores digitales para ver la diferencia de potencial entre sondas.



(Proceq, Folleto informativo Resipod Family)

Según las investigaciones existentes sobre el tema y los proveedores de equipos para medir la resistividad eléctrica, las posibles aplicaciones para esta técnica son las siguientes: (Proceq, Folleto Informativo Resipod Family)

- Estimación de la probabilidad de corrosión.
- Indicación de la velocidad de corrosión.
- Correlación con la permeabilidad al cloruro.
- Evaluación en el emplazamiento de la eficiencia de curado.

- Determinación de los requisitos de zonas individuales para sistemas de protección catódica.
- Identificación de zonas mojadas y secas en una estructura de hormigón.
- Indicación de variaciones en las relaciones agua/cemento dentro de una estructura de hormigón.
- Identificación de las zonas más susceptibles a la penetración de cloruro dentro de una estructura.
- Correlación con la permeabilidad al agua de rocas.

### Influencias

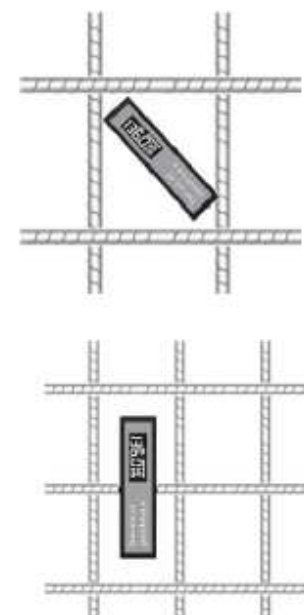
Existen variables que afectaran la medición, sobre todo considerando que el hormigón armado es un material no homogéneo; por lo que será importante conocer las características de los áridos, el cemento utilizado y el espesor del recubrimiento de las armaduras y sobretodo su ubicación.

#### **Influencia de las barras de acero**

El acero tiene una gran conductividad eléctrica, lo que puede distorsionar la toma de mediciones sobre la superficie del espécimen, esto con mayor posibilidad de ocurrencia si el recubrimiento es menor a 30 mm. En condiciones óptimas la sonda no debería usarse sobre las barras, ni paralela a las barras, de manera de no

entorpecer las mediciones; por otra parte se recomienda realizar al menos 5 repeticiones en un mismo

Antes de la medición es necesario detectar la ubicación de las armaduras, con el objetivo de ubicar la medición entre estas, si esto no es posible debido a que la densidad de barras de acero es alta y las separaciones entre cada una son menores que la distancia de las sondas del equipo de medición, se recomienda realizarla con la barra ubicada entre las sondas centrales, tal como se ilustra en la imagen a continuación: (Proceq, Manual de operación Ensayos de durabilidad de hormigón)



(Proceq, Folleto informativo Resipod Family)

### **Tamaño del árido**

Otro factor a considerar es el tamaño de los áridos que componen el hormigón, ya que la electricidad que se mide es aquella que fluye por entre el líquido existente en los poros del hormigón y los áridos no son conductores de la electricidad, por lo tanto la distancia entre las sondas deberán ser superiores al tamaño del árido, asegurando el posible contacto con las áreas que si están conduciendo la electricidad.

### **Temperatura**

Existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la resistividad, esto quiere decir que al aumentar la temperatura del hormigón, disminuye la resistividad y viceversa. Será necesario medir la temperatura del espécimen durante las mediciones, ya que existe una convención de referencia de 20°C. Estudios muestran que en aumentos de temperatura de un grado puede reducir la resistividad hasta en un 3% para hormigón saturado y un 55% para hormigón seco. De este punto se puede deducir que un hormigón que este expuesto a cambios de temperatura constantes, tendrá mediciones de resistividad muy variables, dependiendo de la temperatura en que se realicen. Sin embargo, este punto no quiere decir que las dichas mediciones sean falsas o poco confiables, si no que más bien muestran que el hormigón es más vulnerable en determinados momentos, según la temperatura en que se encuentre. Lo que ratifica que la relación con el medio

ambiente es un constante peligro para las estructuras de hormigón expuestas sin protección.

### **Humedad**

La misma relación inversamente proporcional que tiene la resistividad con la temperatura, sucede con el porcentaje de humedad que contiene el hormigón, esto quiere decir que mientras más humedad contenga, la resistividad será más baja. Este punto es fácil de entender, ya que como hemos declarado con anterioridad, la resistividad se relaciona al paso de la corriente eléctrica por el líquido existente en los poros del hormigón, lo que se puede entender que ha mayor humedad, mayor será el líquido que pueda transportar esta corriente eléctrica. Hará del hormigón un mejor conductor eléctrico.

### **Carbonatación**

El hormigón carbonatado tendrá una resistividad eléctrica más alta que la de un hormigón sin carbonatar, sin embargo, la relación dependerá de la profundidad que tenga la capa de carbonatación, si esta capa es mayor a la distancia entre sondas, perjudicará la medición, por lo que sería necesario aumentar la distancia entre las sondas. De lo contrario si la capa de carbonatación no es gruesa, el efecto en la medición será despreciable. Este es un punto a analizar, ya que la carbonatación del hormigón es en sí misma es un proceso que permite la corrosión de las armaduras existentes dentro del hormigón armado.

Específicamente es la penetración del dióxido de carbono de la atmosfera ( $\text{CO}_2$ ) que reacciona con el calcio y los hidróxidos alcalinos que están presentes en el hormigón. Mayormente se forma Carbonato Cálcico que se deposita en el interior del hormigón, esto produce una reducción en el pH en la disolución de los poros a valores cercana al pH neutro (7-8), lo que da las condiciones para que se presente la corrosión activa de la armadura, el ataque se generaliza en la superficie del acero. Sin embargo, este proceso es superficial, ya que es una reacción producida por los gases existentes en la atmósfera, no genera directamente problemas en la integridad del hormigón hasta que el desarrollo no haya avanzado hasta la profundidad en la que se encuentre el acero y salga de su estado de pasivación. (Gonzalez, 2011)

### **Relación Agua/Cemento**

Ya que se relaciona la porosidad de la superficie de hormigón a la capacidad de este de absorber humedad y por ende ser buen o mal conductor eléctrico, la relación Agua/Cemento, también será una característica importante a conocer y determinara la cantidad de poros del hormigón a analizar. Sin olvidar que en la calidad de la superficie del hormigón también será importante durante la ejecución, un buen vibrado de la mezcla, para evitar defectos como coqueas superficiales.

Finalmente, es importante conocer que la resistividad eléctrica también puede ser utilizada para evaluar otras características del hormigón, como por ejemplo su

permeabilidad, la resistividad puede asociarse a la velocidad de difusión del cloruro, las zonas donde es más susceptible a la penetración del cloruro, serán a la vez más permeables.

Se puede evaluar también la eficiencia del curado de las mezclas de hormigón, ya que se puede determinar mediante la resistividad el secado prematuro del hormigón, esta relación es posible debido a la alta sensibilidad que tiene la resistividad con respecto a la cantidad de humedad que contiene la superficie de hormigón analizada. Por último, otra aplicación útil de la resistividad es al momento de utilizar la protección catódica en una estructura de hormigón. Mediante un cartografiado en el emplazamiento se podrá revisar cuales son las zonas en que se requieren diferentes niveles de flujo de corriente al aplicar el método catódico.

### **2.2.3. Ultrasonido**

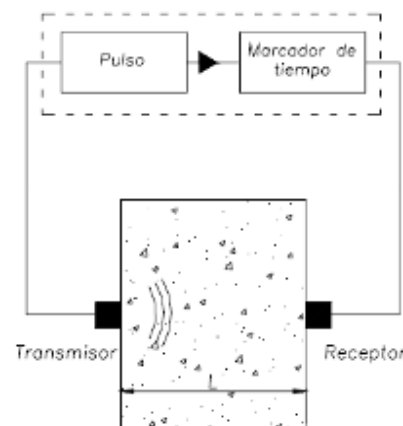
Un palpador electroacústico mantenido en contacto con la superficie del hormigón en ensayo emite impulsos de vibraciones longitudinales ultrasónicas (>20 KHz). Después de atravesar en el hormigón una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso. (AENOR, 2006)

El interés de este ensayo no destructivo es que en términos generales se puede deducir que, a mayor velocidad de propagación del impulso ultrasónico, mayor será la resistencia

mecánica del hormigón, ya que el impulso se transmite por la masa de la estructura, entonces, mientras más densa es, más rápido podrá transmitir este impulso. La velocidad de propagación ultrasónica dependerá directamente del contenido de cavidades y de la estructura de poros del hormigón. Como también de la posibilidad de que se presenten fisuras o grietas en las superficies del espécimen a ensayar. Un impulso ultrasónico se verá interrumpido por estas posibles lesiones, lo que retardará el traspaso de las vibraciones por el medio conductor que representa ser el hormigón.

Por lo tanto, podemos decir que la diferencia de la densidad del hormigón dará diferentes velocidades de propagación del pulso ultrasónico, traduciéndose en una mayor o menor resistencia. Por ejemplo, una zona de la estructura de hormigón que tenga diferencias en la relación agua/cemento puede disminuir tanto la resistencia como la velocidad en dicha zona.

El principio para ser medido mediante equipos especiales depende de un temporizador electrónico que mide dicha velocidad, cuando el transductor emisor inicia la señal ultrasónica, es al mismo tiempo el comienzo del pulso eléctrico que enciende el temporizador; las vibraciones del transductor se transfieren al concreto a través de un líquido viscoso que hace de acoplador y permitirá que el transductor receptor en el momento de llegada del impulso, sea detectado y marcado por el temporizador.



El método de ultrasonidos se ha empleado, en el hormigón, para el estudio de: (Ortega, 2007)

- Identificación de zonas débiles en su estructura (test de homogeneidad);
- Defectoscopía (medida y dimensiones de defectos), espesores de capas dañadas por frío o fuego, ataques químicos, acción del fuego / calor, etc.;
- Medidas de las constantes físicas, tales como el Modulo de Elasticidad Dinámico;
- Evolución de procesos de fisuración y microfisuración, bajo carga;
- Determinación de la resistencia a compresión y tracción.

A su vez, las pruebas normalmente usadas son: (Proceq, Manual de operación Pundit Lab / Pundit Lab+ Instrumento Ultrasonico, 2013)



- Medición de la velocidad de pulso
- Medición de la longitud de recorrido
- Evaluación de uniformidad
- Medición de la velocidad superficial
- Medición de la profundidad de grietas
- Estimación del módulo

La diversidad de posibilidades que permite esta técnica a popularizado su uso e incentivado su implementación y estudio. Se ha buscado estandarizar los ensayos gracias al código ASTM C 597, la norma Europea UNE-EN 12504-4 entre otras.

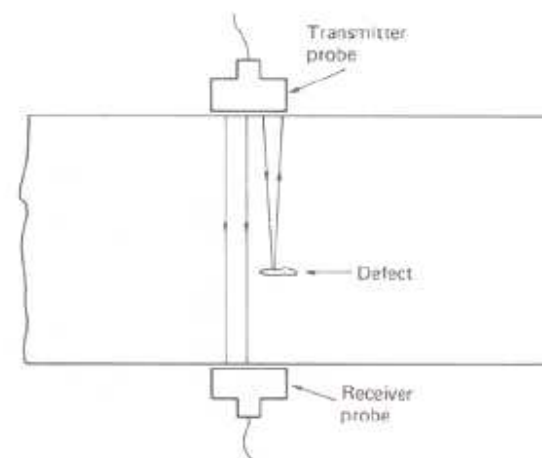
De las investigaciones más especializadas, esta la realizada por Malhorta (Canadá, 1985), pudiendo reconocerse lo siguientes rangos luego de realizados ensayos en laboratorio y correlacionado resultados.

CLASIFICACION DEL HORMIGON SEGÚN SU VELOCIDAD ULTRASONICA	
Velocidad Ultrasonica v (m/s)	Clasificación del hormigón
$V > 4575$	Excelente
$4575 > V > 3660$	Bueno
$3660 > V > 3050$	Cuestionable
$3050 > V > 2135$	Pobre
$V < 2135$	Muy Pobre

### Propiedades posibles a ser evaluadas:

#### Detección de Coqueras:

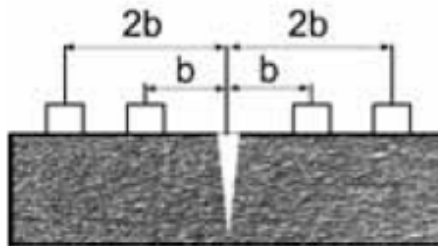
La detección de coqueras es fácilmente realizable mediante la inspección visual que se le realiza a un espécimen antes de analizar. Basta con colocar de tal forma los transductores para asegurarse que la trayectoria de la onda pase por el defecto. Ya que el impulso busca propagarse por la materia y no logra hacerlo a través del aire, el defecto obligará a la onda a “rodearlo”, aumentando la trayectoria de la onda antes de ser captada por el transductor receptor, lo que se traduce como una disminución de la velocidad, respecto a la medición en un lugar visualmente sin defectos de coqueras superficiales.



(Tobio, 1967)

### Estimación de la profundidad de las fisuras superficiales:

Una característica importante de esta técnica es la posibilidad de medir la profundidad de las grietas o fisuras que existen en el hormigón, mediante un trabajo de triangulación y comparación entre una batería de mediciones distanciadas proporcionalmente en referencia con un punto limpio de medición que no presente lesiones. Los primeros que emplearon los ultrasonidos para medir la profundidad de grietas fueron Leslie J.R. y Cheesman W.J. en 1949.



(Proceq, 2013)

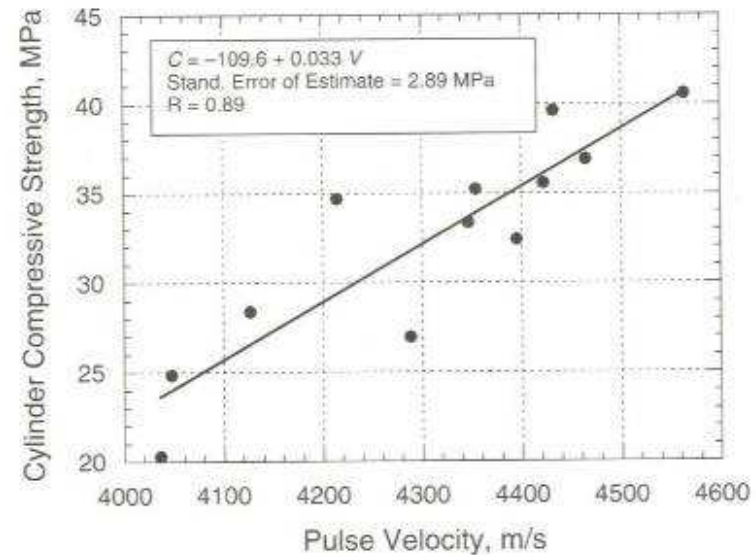
Los equipos actuales vienen configurados con la capacidad de realizar dichos cálculos, lo que permite una mayor claridad y certeza al momento de realizar el ensayo, aumentando su confiabilidad como método de monitoreo no destructivo de fácil utilización e interpretación de datos in situ.

### Estimación de la Resistencia:

El uso de la medición del pulso ultrasónico in situ para la estimación de la resistencia de especímenes de hormigón armado, continua siendo no del todo confiable. Aún combinando una adecuada calibración en laboratorio con las mejores condiciones de medición in situ, como control de las

variables ambientales, información 100% fiable de la composición y ejecución del hormigón, etc. será probable llegar a una confianza igual al 95%, según estudios realizados al respecto. Es por esto que se recomienda la realización de pruebas en laboratorio que tengas mayor grado de confianza y así comparar con datos obtenidos en terreno. De todas maneras, muchas veces puede ser este tipo de ensayo el único factible de realizar y sus estimaciones continuaran siendo validas como referencia.

En los estudios realizados por Malhorta y Carino, (Malhotra. V.M, 2004) encontramos la siguiente relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión:



### Evaluación de la uniformidad del hormigón:

Mediante un cartografiado de la superficie que se quiere ensayar, realizando curvas de nivel de las velocidades registradas en las mediciones, se puede analizar la uniformidad y la calidad de la ejecución de la obra.

Revisando la bibliografía referente al caso, existe una escala de coeficientes de variación expresados en porcentajes que traducen las curvas obtenidas. Por ejemplo una variación de un 1,5% representa un buen nivel de ejecución en un elemento estructural constituido por un solo cargamento de hormigón, mientras que un coeficiente de 2,5% representa un elemento construido por varios cargamentos de hormigón con diferencias en su dosificación y/o ejecución. Este tipo de ensayos puede ser utilizado tanto para control de calidad y de ejecución en obra.

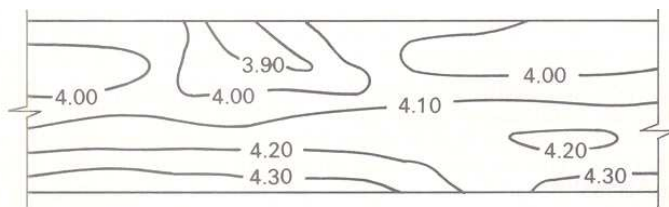


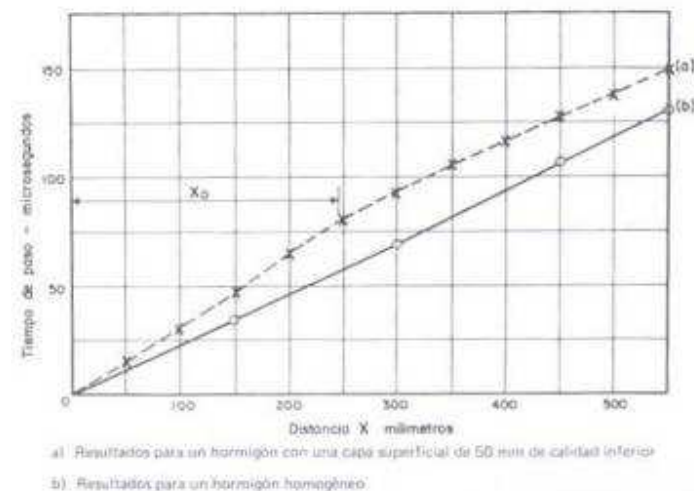
Figure 3.20 Typical pulse velocity beam contours (km/s).

(Tobio, 1967)

### Estimación del espesor de una capa de hormigón de inferior calidad:

En casos en que se sabe o se evidencia la existencia de una capa de hormigón de inferior calidad en una superficie de

hormigón, ya sea por defectos de ejecución, consecuencias de la acción del fuego, heladas, ataque de sulfatos o por reparaciones mal realizadas, es factible mediante la realización de mediciones ultrasónicas. El procedimiento es similar al de la medición de la profundidad de una grieta superficial, ya que deberán hacerse cierta cantidad de mediciones desplazando el transductor receptor una distancia de referencia para luego identificar si las velocidades del pulso tuvieron cambios importantes. Esto es porque a pesar de ir modificando la distancia, la velocidad debería ser constante, pero a partir de una cierta distancia, el impulso traspasará la capa superficial de menor calidad y llegará al hormigón de mejor calidad, aumentando el tiempo del trayecto y haciendo variar la curva de velocidades, que en un hormigón homogéneo debiera ser siempre constante.



(Tobio, 1967)

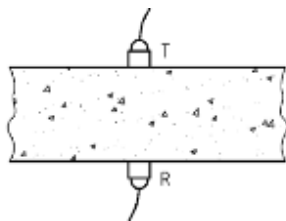
## Influencias

Existen factores que influyen la toma óptima de mediciones, entre estos podemos destacar:

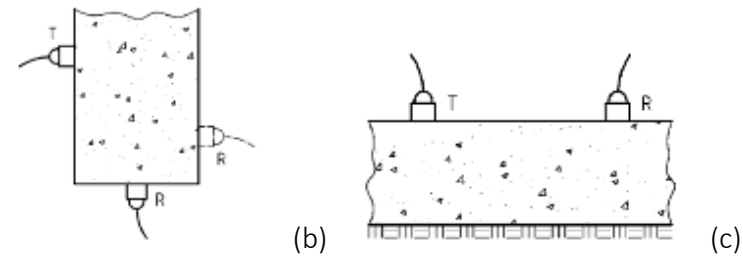
### **Correcta ubicación de los transductores:**

Según las posibilidades de ubicación que permita el ensayo, existirán 3 formas distintas de poner los transductores. Aunque el impulso se transmite perpendicular a la superficie del transductor, es importante conocer las diferencias entre las posibles ubicaciones de estos y entender que la vibración será de todas maneras detectada por el transductor receptor. De todas maneras se recomienda la utilización de la medición directa (a), siendo esta la más precisa ya que enfrenta los transductores y el impulso es captado en la misma dirección en la que fue emitido. La disposición semidirecta (b) es menos precisa que la anteriormente descrita, sin embargo, es mejor que la indirecta o superficial (c).

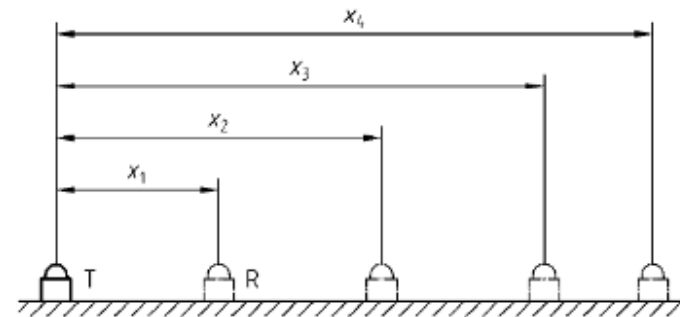
La medición indirecta o superficial es probablemente la más utilizada debido a que regularmente no será fácil acceder a ambas caras de la estructura con el equipo de medición. Será muy útil para la medición de la calidad superficial del hormigón y la medición de la profundidad de grietas.



(a)



Para las mediciones indirectas existe un procedimiento adicional que debiera ser aplicado para no observar variaciones fuera de norma en los resultados del ensayo. Al no tener una certeza del lugar donde se ha recibido la señal en la base del transductor, es recomendado realizar una serie de mediciones continuas que luego serán promediadas y tomadas como referencia, colocando el transductor emisor en un punto  $x$  y luego de la primera medición, ir desplazando el transductor receptor una distancia acordada, incrementando siempre la misma distancia.



Los resultados deberán analizarse, si hay altas variaciones de los valores de velocidad registrados, esto indicara la presencia de una grieta superficial o una diferencia importante en la calidad de la capa de hormigón donde se ha realizado la muestra, por lo tanto la prueba no es fiable. (AENOR, 2006)

De todas maneras, la tecnología de los equipos actualmente disponibles, presenta la opción de registro ya calculada y programada para realizar mediciones superficiales a distancias que van incrementándose tal como lo muestra el ejemplo, si la medición no está dentro de los rangos esperados el equipo lo considera como no valido y no es registrado.

#### **Acoplamiento de transductores al hormigón:**

Para asegurar una correcta realización de la medición, los transductores deben ir bien acoplados acústicamente a la superficie del hormigón y de esta manera asegurar la transmisión del pulso ultrasónico. Para esto será necesario utilizar un acoplador que generalmente será una solución viscosa-acuosa tipo vaselina, gel, grasa, jabón liquido, glicerina, etc.

Además de esto, la superficie del hormigón debiera ser lo suficientemente lisa como para generar este acoplamiento mediante la solución agregada, se recomienda limpiar las superficies de toda polución y si esta es demasiado rugosa puede ser alisada o pulida, y al mismo tiempo se le puede agregar un endurecedor superficial de secado rápido tipo

resina epoxi que asegure una superficie de contacto optima. De todas maneras existen transductores especiales para superficies demasiado rugosa o en el caso de que no se desee agregar un endurecedor superficial que modifique las características originales del espécimen a ensayar.

#### **Contenido de humedad y temperatura:**

Es sabido que el correcto curado del hormigón dependerá de entre otros factores, de la humedad y temperatura con que se realice este proceso. Las características mecánicas no serán las mismas entre dos curados distintos del mismo tipo de hormigón; a su vez, el contenido de humedad y la temperatura de la estructura de hormigón luego de fraguado y como estructura en uso, definirá diferentes características de vulnerabilidad a ataques del medio a esta estructura. Por lo tanto se recomienda conocer estos datos durante el procedimiento de los ensayos, que gracias a estudios anteriores ya realizados por diferentes autores, se ha llegado a conclusiones que permiten codificar coeficientes de corrección aplicables a hormigones que no se encuentren dentro de los rangos normalizados para los equipos de ensayo. De esta forma, los ensayos realizados a una temperatura entre 10°C y 30°C, no necesitan factor de corrección.

A continuación se muestra una tabla que entrega estos factores relacionándolos además con el contenido de humedad del espécimen: (Proceq, Manual de operación Pundit Lab / Pundit Lab+ Instrumento Ultrasonico, 2013)

TEMPERATURA	HORMIGON SECO	HORMIGON HUMEDO
10°C a 30°C	1.0 (sin corrección)	1.0 (sin corrección)
60 °C	1.05	1.04
40 °C	1.02	1.02
0 °C	0.99	0.99
-4 °C	0.98	0.92

A modo ilustrativo, en la literatura relativa al tema se habla de que la velocidad de un impulso ultrasónico en un hormigón saturado puede ser 5% mayor que la velocidad en el mismo hormigón en condiciones secas.

El trabajo de R.Jones y Facaorau publicado en la revista Materials and Structures n°10 en 1969, explica la posibilidad de micro fisuras internas a temperaturas altas, y los efectos del agua congelada en el hormigón a temperaturas bajas. El primer efecto hace disminuir la velocidad del impulso generando cámaras de aire en el recorrido de la onda; el segundo efecto aumenta la velocidad del impulso, al propagarse mejor la onda en el agua congelada. (Tobio, 1967).

#### Longitud de la trayectoria y tamaño del árido:

Existe una relación directa entre el tamaño del árido y la longitud de trayectoria óptima que debería ser utilizada durante la medición para obtener resultados confiables. La longitud de trayectoria es uno de los datos que podemos conocer antes de realizar la medición, por lo que debe ser

tomada con precisión, en base a esto se calculará la velocidad de la señal ultrasónica. Como sabemos la velocidad es medida como el desplazamiento en una unidad de tiempo; por lo que conocer el desplazamiento, ser exactos en agregar este dato, que será como referencia el punto medio de las caras de cada transductor, es lo que permitirá saber el tiempo que se demora la medición y así la velocidad de transmisión en que la vibración entre que fue emitida y fue recibida.

Por otra parte el tamaño del árido afectará a la recepción de esta señal, ya que las ondas necesitan un medio en el cual transmitirse, este medio puede ser lo bastante uniforme o no. El hormigón es un material no homogéneo, por lo que la señal necesita dimensiones mínimas de separación entre sondas para lograr un recorrido que pueda ser confiable y medible. Las recomendaciones generales de Longitud de recorrido mínima son las que se detallan a continuación: (Proceq, Manual de operación Pundit Lab / Pundit Lab+ Instrumento Ultrasonico, 2013)

<b>100 mm</b>	Tamaño de áridos máximo de 20 mm o menos.
<b>150 mm</b>	Tamaño de áridos máximo de 20 a 40 mm.

Como referencia para entender este fenómeno, se realizaron ensayos para hormigones con una misma resistencia a compresión, dando como resultado que la velocidad del impulso es más alta en un hormigón con árido tipo grava, que en un hormigón con árido tipo granítico, y aun más alta que en un hormigón con un árido tipo calcáreo. (Tobio, 1967)

### Dimensiones laterales mínimas de la muestra:

Existen recomendaciones que relacionan la longitud de donde de transmisión, la velocidad de pulso, la longitud de recorrido y la dimensión lateral mínima de la muestra. Si la dimensión lateral es menos que la longitud de onda, la forma de propagación cambia y por lo tanto la velocidad medida será diferente. Puede tener una reducción considerable, que será la dificultad del transductor receptor de interpretar desde donde ha sido enviado el pulso, y que el medio de transmisión no es lo suficientemente confiable.

Frecuencia Tx kHz	Velocidad de pulso 3500 m/s	Velocidad de pulso 4000 m/s	Velocidad de pulso 4500 m/s
Dimensiones laterales mínimas del objeto de ensayo			
24	146 mm	167 mm	188 mm
54	65 mm	74 mm	83 mm
150	23 mm	27 mm	30 mm

### Efecto de las barras de acero:

Como hemos explicado antes, el pulso ultrasónico se transmitirá por un medio específico que en este caso es el hormigón, en el caso de que la muestra sea tomada precisamente sobre una barra de acero, esto alterará la transmisión del pulso, ya que el acero es mucho más conductor que el hormigón.

Se recomienda evitar posicionar los transductores sobre o próximo a una barra, y sobre todo evitar que esté paralela al recorrido del pulso.

### Estado tensional previo del hormigón:

Es necesario tener en cuenta la posibilidad de que el espécimen de hormigón analizado se encuentre en un estado de tensión superior al 50% de la tensión de rotura, que aunque tal vez no sea un indicador de riesgo excesivo para la estructura, es probable que este generando microfisuras internas que será causal de una disminución de la velocidad del impulso. Este caso se puede encontrar en ensayos de transmisión superficial en estructuras sobre esforzadas constantemente por su uso o por su posición en la estructura general de edificio, como esquinas o vigas en volado.

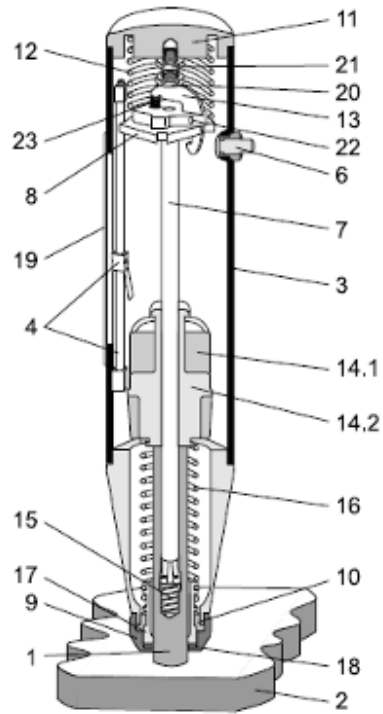
Como también en estructuras que hayan sufrido tensiones superiores a las admitidas durante el proceso de ejecución como por ejemplo almacén de barras de armadura, encofrados, máquinas pesadas, etc.

#### 2.1.4. Esclerómetro

La técnica de la medición esclerométrica está basada en un martillo de rebote, también llamado Martillo Schmidt, el que tiene como principio la relación que existe entre la dureza de una superficie y la energía recuperada en el rebote que se genera sobre esta superficie en un elemento que ejerce una fuerza conocida.

Se usa como referencia para deducir la resistencia a la compresión de la estructura de hormigón.





(Proceq, Martillo para ensayos de hormigon, 2011)

1	Punzón de impacto	13	Fiador
2	Superficie de ensayo	14	Masa del martillo
3	Caja	15	Muelle de retención
4	Corredera con varilla de guía	16	Muelle de impacto
5	-----	17	Manguito de guía
6	Botón, completo	18	Anillo de fieltro
7	Barra de guía del martillo	19	Ventana de plexiglás
8	Disco de guía	20	Tornillo de tope
9	Capuchón	21	Contratuerca
10	Anillo de dos partes	22	Espiga
11	Cubierta trasera	23	Muelle de fiador
12	Muelle de compresión		

Este método no es del todo fiable, ya que se demuestra que entre una y varias mediciones realizadas sobre el mismo punto de una superficie, el valor del rebote ira variando, a veces significativamente. Se ha normalizado la cantidad de repeticiones que debería aplicarse a un mismo punto el ensayo para obtener una mediana que represente un valor más fiable. Se habla de entre 9 a 10 veces por punto a evaluar, para luego ubicar la mediana de estos valores. Si uno de estos valores está muy por debajo de la mayoría de los valores registrados, o es demasiado alto, se desestimarán para obtener dicha mediana.

A pesar de esta variable, los estudios han comprobado la gran similitud de resultados que tienen las mediciones esclerométricas realizadas dentro de estos márgenes y recomendaciones, respecto a los ensayos de compresión que se realizan en laboratorios a testigos de hormigón.

La medición del rebote se muestra en una barra lineal que viene incorporada al instrumento, entregando un número cuantitativo de la fuerza que fue recuperada luego del rebote con la superficie, este número luego se traduce, gracias a estudios previos realizados, en una tabla que indica la resistencia relacionada a este indicador.

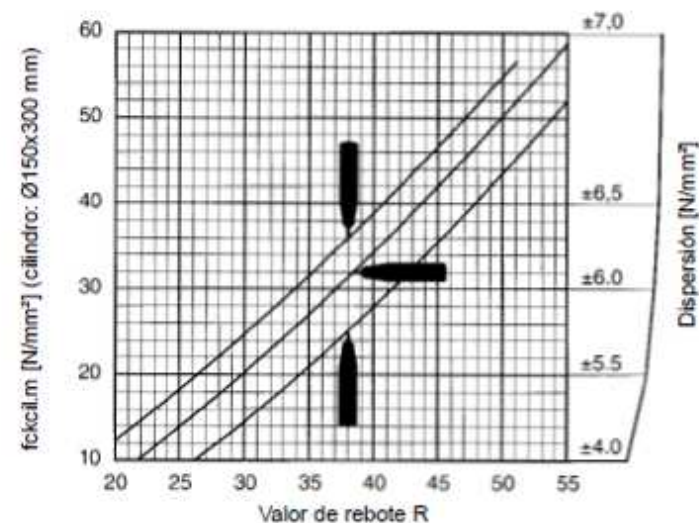
Según la Norma Chilena NCh 1565-1970, no se acepta como referencia exacta de la resistencia a la compresión, como prueba de aceptación o rechazo de hormigones en procesos constructivos, ya que la variación de resultados puede ser amplia. Sin embargo, se acepta como un método viable para:

- Evaluar la uniformidad del hormigón in situ.
- Delinear zonas o regiones de hormigón pobre o deteriorado en las estructuras.
- Indicar cambios en el tiempo de características del hormigón, tales como velocidad de endurecimiento del cemento, acción de temperaturas, etc. Ayuda a determinar plazos de desencofrado.
- supervisión rápida de áreas de hormigones, obteniendo valores de referencia inmediatos.

### Influencias:

#### **Dirección del impacto:**

Las investigaciones han demostrado que el ensayo realizado sobre una superficie vertical, horizontal, hacia arriba o hacia abajo, aunque sea realizado en las mismas condiciones, con el mismo martillo de rebote, tendrá diferente resultado. Esto se asocia a la influencia que tendría en la energía recuperada la acción de la fuerza de gravedad. Por lo que se recomienda, si es posible, realizar las mediciones en una misma dirección para luego ser comparadas. Existen distintas curvas de conversión, según la dirección del impacto realizada para la muestra, las que se muestran a continuación:



(Proceq, Martillo para ensayos de hormigón, 2011)

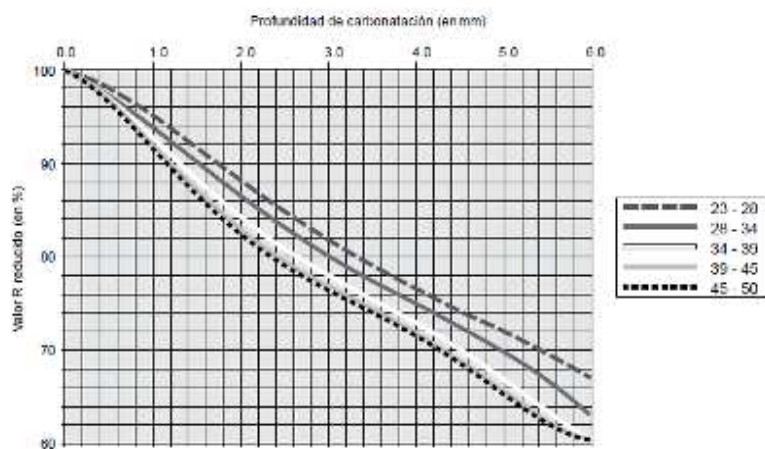
Estas curvas están basadas en la resistencia a la compresión promedio de un cilindro y valor de rebote R, después de 14 a 56 días, en un modelo de esclerómetro tipo N.

#### **Edad del hormigón y carbonatación:**

Será necesario conocer si el hormigón a analizar presenta características de estar carbonatado, ya que este proceso tiende a endurecer superficialmente las estructuras, dando resultados falsos y poco fiables al momento de realizar el impacto del rebote. La carbonatación es un proceso que va incrementándose a medida que pasa el tiempo en las estructuras, por lo que un indicador para deducir esta posibilidad es conocer la edad del hormigón. Para disminuir este efecto, se recomienda la limpieza de la superficie a

ensayar mediante la eliminación de la capa carbonatada utilizando una amoladora manual, en un área de al menos 120 mm de diámetro, de este modo el rebote sería efectuado en una capa de hormigón algo más sana que su estado original, sin embargo, si la penetración de la carbonatación es mayor, no podrá quitarse simplemente con una limpieza superficial. Por ejemplo, la Norma Chilena, especifica que en hormigones con una edad de más de 6 meses se deberá realizar un desgaste mecánico de al menos 5 mm para limpiar los efectos de la carbonatación superficial.

A su vez, se han realizado ensayos y gracias a estudios extranjeros y a la norma china relativa a este campo, existen tablas de disminución de los valores de rebote, según la profundidad de penetración de la capa de carbonatación, que se muestra a continuación:



(Proceq, Martillo para ensayos de hormigón, 2011)

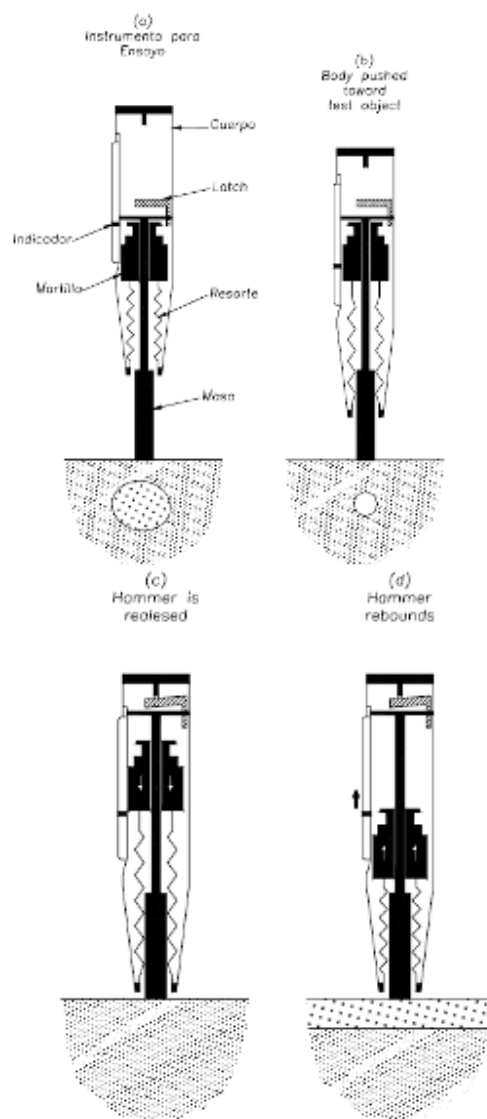
### Preparación de la zona de ensayo, forma y tamaño:

Se deberá tener especial cuidado en realizar el ensayo sobre una superficie óptima, esto quiere decir que no es factible realizar esta medición en superficies que están demasiado sucias o que sean en exceso texturadas, se recomienda utilizar la piedra de amolar que viene en conjunto con el equipo de ensayo para alisar las superficies lo suficiente antes de comenzar el ensayo o aquellas que estén estucadas, este recubrimiento debiera ser retirado previamente.

Tampoco se recomienda realizar mediciones en elementos que tengan menos de 100 mm de espesor (en el caso del martillo tipo N), ya que la fuerza del impacto que realiza el martillo puede afectar la integridad del espécimen, en tal caso, será aconsejable fijar el elemento de hormigón a otra superficie que asegure el impacto y así evitar desviaciones o flexiones. Otro punto a considerar es la forma, esta no debiese estar por debajo de las dimensiones del cilindro de pruebas con las que se ha ensayado en laboratorio y con las cuales se han fabricado las curvas de conversión, ya que la medición no será comparable con estos datos empíricos.

Por otra parte, será importante conocer la homogeneidad de las capas inferiores del lugar donde será realizada la medición, ya que en la eventualidad de que se presente una coquera no superficial o la ubicación inmediatamente después de un arido de grandes dimensiones, incluso asegurarse de que la superficie a ensayar corresponde al hormigón estructural y no

a una capa de inferior calidad, utilizada en ocasiones para afinar o enlucir la terminación de la obra.



(Ortega, 2007)

En el ejemplo se puede entender lo anteriormente descrito, ya que la fuerza emitida por el martillo será propagada no solo por la superficie del hormigón, lo que exista debajo del lugar de ensayo hará variar los indicadores. Si bien la naturaleza del hormigón es ser heterogéneo, evitar este tipo de incidencias es lo que se recomienda, junto con realizar un grupo repetido de muestras en un mismo lugar y sacar una mediana de estos índices de rebote para evitar desconfianzas en los registros.

-SEGUNDA PARTE-

## 3. CAMPAÑAS

### DE DETECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN ESPÉCIMEN DE HORMIGÓN ARMADO

#### 3.1. ANTECEDENTES

##### 3.1.1. Generalidades

La realización de estas campañas fue durante un periodo de 2 meses, comprendidos entre el 19 de Noviembre de 2013 hasta el 20 de Enero 2014, durante ese tiempo se ejecutaron las mediciones correspondientes a la detección visual, de resistividad eléctrica, ultrasonidos y esclerómetro, las cuales van además complementadas con la toma de datos de la temperatura ambiental del momento, la temperatura de la superficie del hormigón, como también la humedad relativa del aire y la del espécimen. Además se realizaron tomas de termografía infrarroja, las cuales no serán utilizadas en este estudio debido a la poca claridad e información que ofrecían las imágenes, al haberlas realizado con la técnica pasiva, donde el espécimen no es excitado con un calor externo, esto, por causa de las condiciones mismas de la campaña, se dificultaba la excitación de una muestra tan extensa como la analizada.

Así mismo, en este capítulo se explicara detalladamente cómo fue realizada la campaña y las diferentes técnicas y equipos que fueron utilizados, de manera que se pueda concluir de forma previa el alcance y efectividad de los métodos, para luego proceder a la correlación de los datos que nos permitan reconocer las ventajas posibles de complementar unos ensayos con otros.

##### 3.1.2. Metodología de Trabajo

La metodología de trabajo se determinó gracias al conocimiento adquirido en el capítulo precedente, donde se entiende que la muestra deberá ser lo más sistemática posible, reconociendo las variables que pueden afectar las mediciones. Una variable importante a considerar fue la necesidad de ubicar correctamente la ubicación de las barras de acero dispuestas en el muro de hormigón a analizar, ya que como se explico anteriormente, tendrán incidencia en la mayoría de los resultados que arrojen los equipos de medición, para esto fue necesario conseguir la información técnica con la cual fue construida la estructura, tanto planimetría como especificaciones técnicas, para luego ser comprobadas mediante el uso de un detector de barras de acero. El trabajo realizado fue completamente en terreno, con los equipos e implementos necesarios, pudiendo compararse con un probable uso en obra de estas técnicas, lo que considera variables tanto climáticas como de accesibilidad a ciertos puntos del espécimen.

Toda la logística para el desarrollo de este trabajo fue primordial para llevarlo a cabo, la que se expone en el punto siguiente con detalle.

### 3.1.3. Medios, Equipos y Materiales del Procedimiento Experimental

Los medios para la realización de esta tesina fueron en su totalidad patrocinados por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Valles, gracias a la gestión del Profesor Tutor de esta tesina, Doctor Arquitecto Joan LLuis Zamora I Mestre, se contó con la colaboración de una ayudante becaria, estudiante de último año de Arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Laia Arimany Nardi, quien participó activamente en todas las mediciones.

- *Espécimen*, muro de hormigón armado edificio CRITT, ETSAV. Se explicaran más adelante sus características particulares.
- *Andamio*, Implemento con el cual era indispensable contar, debido a la altura del espécimen y a la necesidad de abarcar las zonas altas del muro. Fue utilizado en un largo total de 6.5 m, lo que constituye la mitad del largo total del espécimen, y un alto de 4 m aproximadamente. Durante las mediciones fue necesario modificar la altura de las pasarelas contantemente.

- *Equipamiento de Seguridad*, Fue imprescindible contar con un equipo apto para la utilización del andamio, donde podemos destacar:
  - Arnés de seguridad y línea de vida
  - Casco protector
  - Guantes
  - Zapatos de seguridad



Fotografía capturada durante el mes de enero 2014.



- *Medidor de humedad* en madera y materiales. (Materialmoisture; Wood, building materials). (a) Modelo Testo 616. Permite la medición de la humedad superficial de los materiales hasta una profundidad de 5 cm, tiene un visualizador digital iluminado, maneja información relativa a 10 curvas memorizadas para madera blanda, aglomerado, mortero de anhidrita, mortero de cemento, ladrillo tejar, hormigón celular, hormigón, ladrillo hueco, y ladrillo macizo. Entrega la información en porcentaje de peso (%) utilizando las curvas almacenadas de los materiales de construcción anteriormente descritos.
- *Higro-Termómetro Termómetro infrarrojo* (Hygro-Thermometer InfraRed (Thermometer) Modelo RH101. (b) Mediante un sensor infrarrojo es posible medir la temperatura superficial de los materiales de construcción, además contiene una sonda para medición de temperatura ambiente.



(a)



(b)

- *Detector de barras de acero*, modelo PROFOMETER 4 de Proceq. (c) Permite detectar la ubicación de las armaduras al interior del hormigón, como así también conocer su diámetro y espesor de recubrimiento. Contiene memoria y es posible transferir la información estadística al computador.



Fotografía capturada durante las campañas de medición, Diciembre 2013.



- *Equipo de ultrasonidos*, PUNDITLAB de Proceq, Equipo de última generación para la medición de ultrasonidos en el hormigón, contiene información configurada para obtener velocidades de pulso, distancia del pulso, profundidad de grietas, etc. Cuenta con 2 pares de transductores, y un gel especial para realizar el correcto acoplamiento con la superficie a ensayar.



- *Equipo para medición de resistividad eléctrica*, RESIPOD de Proceq, Configurado para calcular la resistividad eléctrica del hormigón, totalmente portátil e impermeable, su principio de medición está basado en la sonda Wenner de cuatro puntos.



- *Esclerómetro*, o también conocido como martillo de rebote o martillo Schmitz. Formulado para conocer el valor de rebote sobre una superficie, permite conocer la resistencia a la compresión de un elemento de hormigón. Cuenta con un cilindro metálico que contiene un embolo a su interior, el cual se proyecta con una determinada fuerza hacia la superficie a estudiar, además es necesario utilizar una piedra abrasiva con motivo de remover una primera capa superficial de suciedad o carbonatación que modifique la muestra.



Fotografía capturada durante las campañas de medición, Enero 2014.

Además de contar con los equipos necesarios para el estudio, también existió la posibilidad de disponer de los equipos para el trabajo de documentación y transferencia de datos, gracias al uso de las instalaciones del edificio del CRITT, Centre de Recerca i Transferència de Tecnologia, específicamente en las oficinas de LITA, Laboratorio de Innovación y Tecnología de la Arquitectura. Esta oportunidad fue indispensable para un trabajo de campo diario que significaba la utilización de variados equipos, y que además gracias a la tecnología de los mismos la transferencia de datos de registro de las mediciones podía ser hecha de inmediato hacia el ordenador, revisando posibles errores o descalibraciones de cada método.

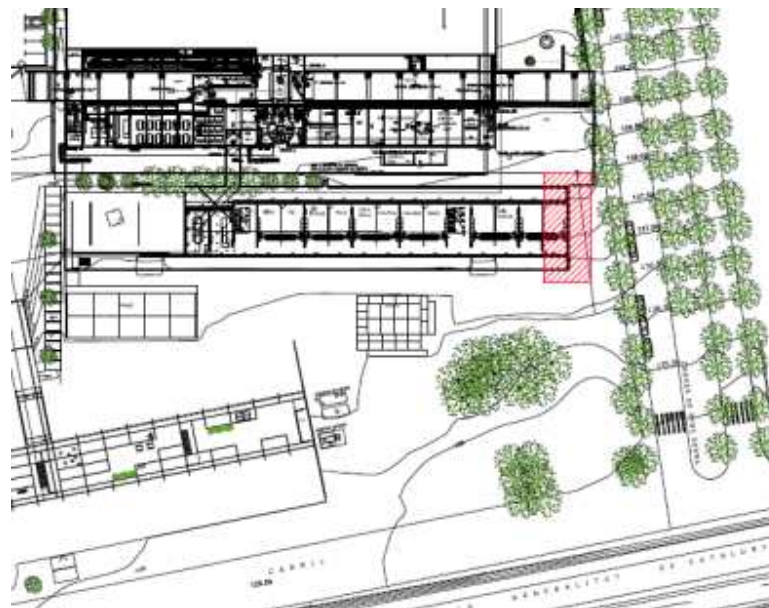


CRITT, Centre de Recerca i Transferència de Tecnologia. ETSAV.  
[www.etsav.upc.edu/critt/](http://www.etsav.upc.edu/critt/)

### 3.1.4. Características del espécimen

El espécimen fue un muro de hormigón armado que compone la fachada Este del Edificio CRITT de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Valles, ubicada en Carrer de Pere Serra 1, Sant Cugat del Valles, Barcelona. Fue diseñado por el Arquitecto alacantí Javier García Solera e inaugurado el mes de abril del año 2006.

En la imagen es posible ver en rojo la ubicación del muro respecto a su emplazamiento dentro de la ETSAV.



Elaboración Propia.

El desarrollo del proyecto técnico fue realizado por la empresa “BOMA” es una consultora de estructuras arquitectónicas y de edificación líder en España. Con más de 35 años de experiencia y más de 7.000 colaboraciones en proyectos de arquitectura, encabezada por los profesionales Robert Brufau, Agustín Obiol y LLuis Moya.

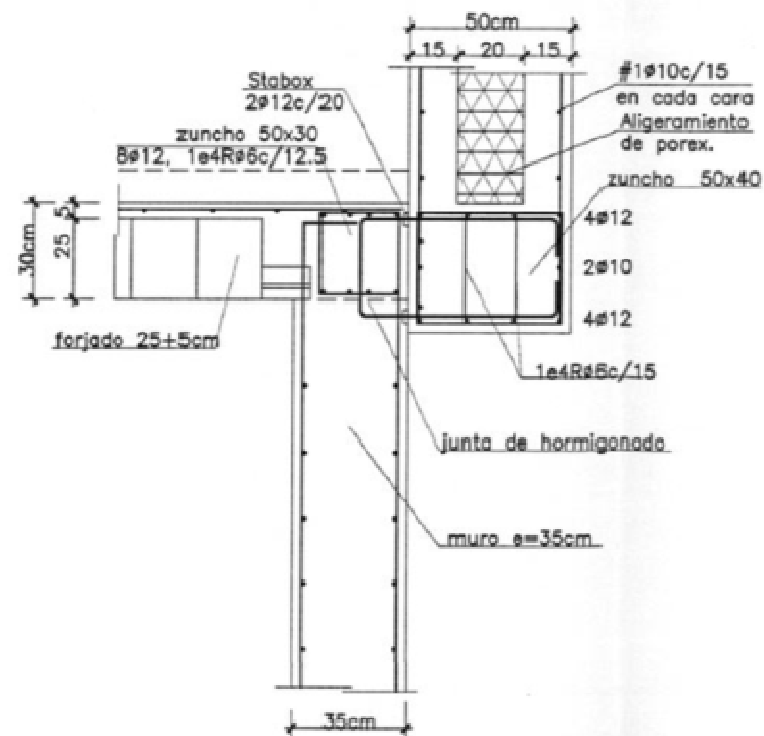


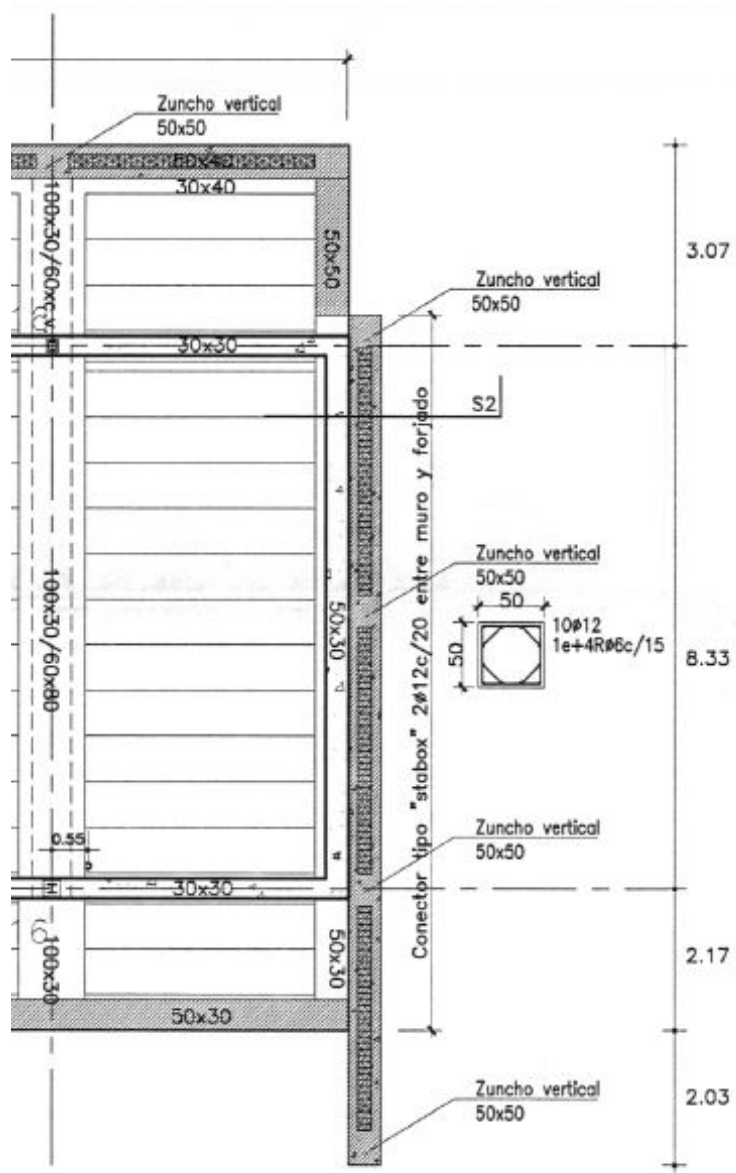
Imagen Propia.

El muro fue diseñado para una resistencia de  $25 \text{ N/mm}^2$  a los 28 días, una relación agua/cemento  $\leq 0.50$ , tamaño de árido aceptable inferior a 20 mm, un recubrimiento de 3,5 cm y con una dosificación de:

Cemento	320	kg/m <sup>3</sup>
Grava	1235	kg/m <sup>3</sup>
Arena	630	kg/m <sup>3</sup>
Agua	160	l/m.

El muro se diseñó de hormigón armado 15/20/15 aligerado con 20 cm de porex en su interior, con zunchos perimetrales verticales y horizontales, y además zunchos verticales interiores, la armadura es una malla cuadrada de 15x15 cm compuesta por fierros de 10 mm de diámetro, tal como se muestra en los siguientes detalles: (BOMA, 2003)

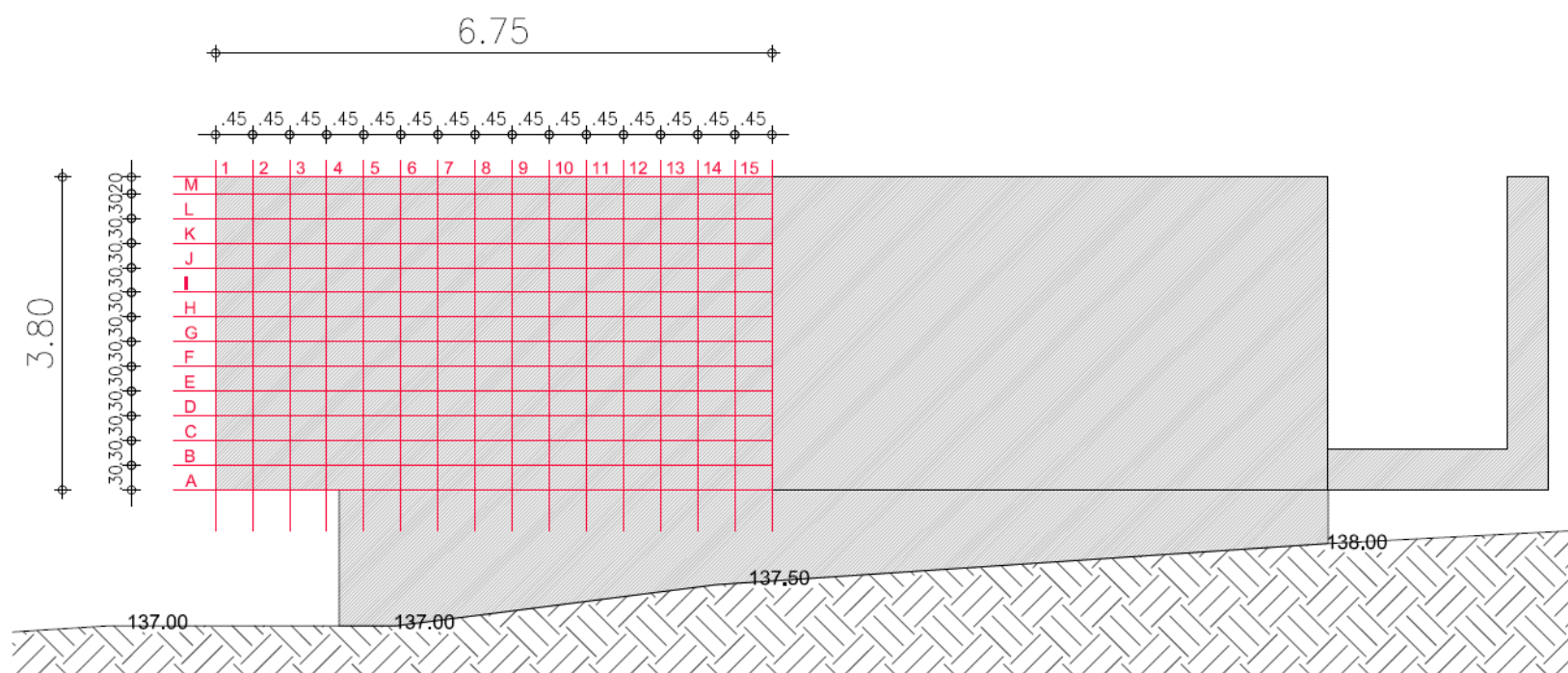




En planta se puede ver el largo total de 12.53 m del muro, con un ancho de 50 cm, que es el remate del bloque de oficinas que compone el edificio. Esta elevado del Nivel de Terreno Natural, es importante aclarar que la muestra fue realizada en la mitad sur de este, mediante una cuadrícula de 15 columnas y 13 filas, dando un total de 195 cuadrantes a los cuales se les aplicó cada una de las técnicas.

(BOMA, 2003)

Cada columna tenía una dimensión de 45 cm y las filas 30 cm, con excepción de la fila superior, denominada fila M, con una diferencia de 10 cm. El alto total del muro es de 3.80 m, el área donde se realizó el estudio es del total del alto por 6.75 m, dando un total de 25.65 m<sup>2</sup>.





## 3.2. CAMPAÑAS

### 3.2.1. Detección Visual

#### Antecedentes

La realización de la campaña de detección visual, fue efectuada en las primeras semanas de trabajo, con el objeto de destacar anomalías que se evidencian a simple vista y que luego serían medidas con las técnicas no destructivas. De todas maneras luego de marcadas las armaduras de acero y del correspondiente marcado de los cuadrantes de la muestra fueron tomadas las fotografías por cada uno de estos, formando una malla de registro digital que permite observar a posterior el espécimen.

El procedimiento básico además de fotografiar, fue marcar mediante el uso de tiza de diversos colores los defectos más sobresalientes como fisuras de fácil reconocimiento y con una prolongación continua, grietas producidas por la corrosión del acero, reparaciones defectuosas y de mala calidad, desprendimientos por impactos, suciedad y humedad, presencia de microorganismos como hongos, coqueas de gran dimensión que presentan el árido a la vista y defectos de ejecución como marcas de encuentros de las placas de encofrado. A continuación se muestran algunos de los cuadrantes.



Cuadrante A2

Humedad, pequeñas coqueas superficiales.



Cuadrante A4

Marcas de encofrado, humedad, rotura por corrosión expansiva del acero, reparación defectuosa.



Cuadrante A7

Reparación de mala calidad por evidente rotura provocada por la corrosión expansiva del acero, mancha de humedad.



Cuadrante A8

Reparación de mala calidad por evidente rotura provocada por la corrosión expansiva del acero. Humedad en el mortero de reparación, coqueras.



Cuadrante A15

Desprendimiento en el borde inferior del muro, coqueras generalizadas y áridos vistos, manchas de humedad.



Cuadrante B4

Marca de encofrado, humedades, coqueras, áridos superficiales.





Cuadrante M15 y L15

Humedades, coqueras, microorganismos, rotura por corrosión expansiva del acero, suciedad.



Cuadrante I4

Humedades, coqueras, árido visto, fisura diagonal.

### Conclusiones Previas

Los defectos son generalizados en toda la superficie del hormigón, en mayor cantidad presentándose las coqueras superficiales de pequeñas dimensiones o aquellas que dejan el árido a la vista, no existe cuadrante que tenga una terminación lisa continua, también se evidencian escorrentías donde se ven humedades superficiales. Todas las juntas de encofrado han dejado marcas, y a su vez se han transformado en microfisuras que absorben humedad, siendo estas un foco de mayor porosidad. También es fácil notar zonas en que han existido reparaciones defectuosas con morteros de baja calidad en lugares donde se produjeron roturas debido a la corrosión del acero, generalmente estos morteros de baja calidad presentan nuevas fisuraciones y focos de humedades importantes.

Otro punto a destacar es la suciedad y acumulación de microorganismos en el borde superior, que demuestran la falta de mantenimiento que ha sufrido el muro de hormigón y que ha permitido el continuo desgaste de la superficie. Como así también el mal estado del borde inferior que ha sufrido desprendimientos probablemente generados por golpes y también por pérdida de la adherencia de la mezcla, mostrando un borde completamente irregular que ha sufrido un tipo de reparación parecido a un estucado con mortero de cemento mal ejecutado.

Como primera observación se puede asegurar una ejecución deficiente, sobre todo en la etapa correspondiente al vibrado

del hormigón, que produjo segregación de los áridos y la pasta de cemento, perdiendo homogeneidad y por tanto se deben presentar diferentes resistencias en cada punto a analizar, al mismo tiempo esto generó bolsas de aire que se manifiestan ahora como coqueas superficiales y probablemente existan coqueas al interior de la masa de la estructura.

Se puede apreciar un hormigón muy poco homogéneo y poroso, con un alta probabilidad de estar siendo afectado por el ataque de cloruros en las armaduras de acero, que ya comienzan a reflejarse con roturas superficiales.

### 3.2.2. Resistividad Eléctrica

#### **Antecedentes**

La campaña de resistividad eléctrica fue efectuada durante dos jornadas el día 10 de enero 2014 y 14 de enero del mismo año, se puede comentar que las mediciones son realizadas de manera muy práctica y rápida, su ejecución es simple gracias al equipo de excelentes proporciones y que además cuenta con memoria integrada para ir grabando las mediciones.

Además del equipo anteriormente especificado, se necesita utilizar un recipiente con agua que permita empapar las sondas del aparato para luego efectuar presión sobre la superficie de hormigón donde será recibido el impulso eléctrico. Este procedimiento es importante de hacer antes de cada medición,

de manera de asegurar una conductividad apreciable y ya concebida para el modelo de medición. Si se llevan a cabo más de una medición antes de volver a empapar las sondas, este puede no ser fiable.



Imágenes Propias

Es importante conocer la ubicación de las armaduras, este dato es fundamental para una correcta medición. La capacidad de memoria del equipo si bien es muy alta, va agrupando según lo deseado, por lo que se utilizó la posibilidad de capturar mediciones por cada fila, realizando los 15 cuadrantes de una sola vez. También fueron registradas la humedad y temperatura ambiente y superficial del elemento de hormigón, para comprobar si durante los días del ensayo se generaban variaciones altas que generaran errores apreciables.

### Conclusiones Previas

Existen dudas sobre algunas mediciones que superan el rango de las tablas codificadas de diferentes autores que fueron estudiados en el capítulo precedente, superando los 200 kΩcm, llegando hasta cantidades de 500 o hasta 1000 kΩcm. El equipo Resipod asume como error los valores superiores a 1000 kΩcm.

El registro de estas cantidades fue efectuado luego de repetir al menos 10 veces y en distintas posiciones la medición, intentando esquivar las barras de acero, empapando las sondas, recalibrando el equipo, apagándolo y encendiéndolo nuevamente, etc.

Sin embargo, estos valores continuaban siendo arrojados, por lo que se procedió a registrar en la memoria. Es complejo arrojar una hipótesis de este brusco cambio, sin embargo no quiere decir que sea un hormigón completamente impermeable ni resistente 100% a conducir la electricidad. Se le llama un “desbordamiento”. Según la bibliografía consultada se recomienda no considerar esta medición.

De todas maneras en el momento de correlacionar estas mediciones con las realizadas con los otros métodos no destructivos se intenta recoger alguna información que pueda indicar algo relativo a este registro fuera de rango.

CLASIFICACION DE PROBABILIDAD DE CORROSION SEGÚN POLDER			
Resistividad	Clasificación	Espécimen (cantidad mediciones)	%
>100 kΩcm	Riesgo de corrosión despreciable	82	42,1
50 a 100 kΩcm	Riesgo de corrosión bajo	40	20,5
10 a 50 kΩcm	Riesgo de corrosión moderado	71	36,4
<10 kΩcm	Riesgo de corrosión alto	2	1
	total	195	100

Exactamente son 2 cuadrantes los que superan los 1000 kΩcm, lo que representa el 1,02% de la muestra.

Al clasificar todos las mediciones, se puede concluir que sobre el 40% del espécimen presenta un riesgo de corrosión despreciable, con registros por sobre los 100 kΩcm.

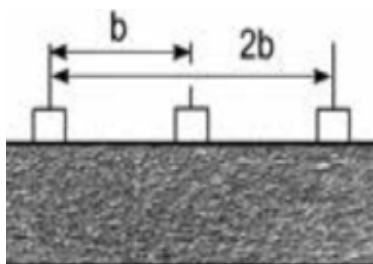
La información arrojada es muy variable, existe el ejemplo de la fila K que contiene oscilaciones entre una resistividad de 234 kΩcm y 14,9 kΩcm.

Como conclusión general la poca homogeneidad del espécimen es evidente, no sólo a la vista de defectos, sino que también se comprueba que existen zonas más vulnerables al ataque de cloruros y que en muchas zonas se encuentra saturado.

### 3.2.3. Ultrasonidos

#### Antecedentes

Antes de comenzar las mediciones fue necesario considerar cual sería la mejor opción para realizarlas. Esto debido a que la posición de los transductores sería indirecta, es decir, la colocación de estos sería sobre el mismo plano, cabe señalar la cara exterior del muro. El equipo utilizado –PUNDITLAB- tiene variadas opciones de medición configuradas, la más óptima para este caso se consideró la llamada medición compuesta, para cálculo de la velocidad superficial del impulso, que si bien continúa siendo indirecta, realiza un promedio de dos impulsos en distancias diferentes para luego indicar la velocidad de ese registro.



(Proceq, Manual de operación Pundit Lab / Pundit Lab+ Instrumento Ultrasonico, 2013)

También fue necesario calibrar el aparato de manera tal como lo indican el manual, utilizando una varilla de calibración que viene incluida en la maleta del equipo, de esta manera aseguramos un correcto trabajo.



Imagen Propia, capturada en oficinas de LITA, CRITT, ETSAV.

Otro antecedente necesario antes de realizar las mediciones es el correspondiente marcado de los puntos donde serán ubicados los transductores, ya que la distancia es una de las variables conocidas. Se procedió a marcar cada 15 cm equidistantes a un punto, de manera de seguir las indicaciones del manual. Debido a las dimensiones de cada cuadrante (45 x 30 cm) se decidió realizar dos mediciones superficiales por cada uno de ellos. Las distancias se miden desde el punto central de cada transductor. En la imagen se puede apreciar las marcas que deja el gel transductor en el muro. Es necesario retirar los restos de este gel luego de realizada la medición. Esta suciedad es removida fácilmente con un poco de agua.

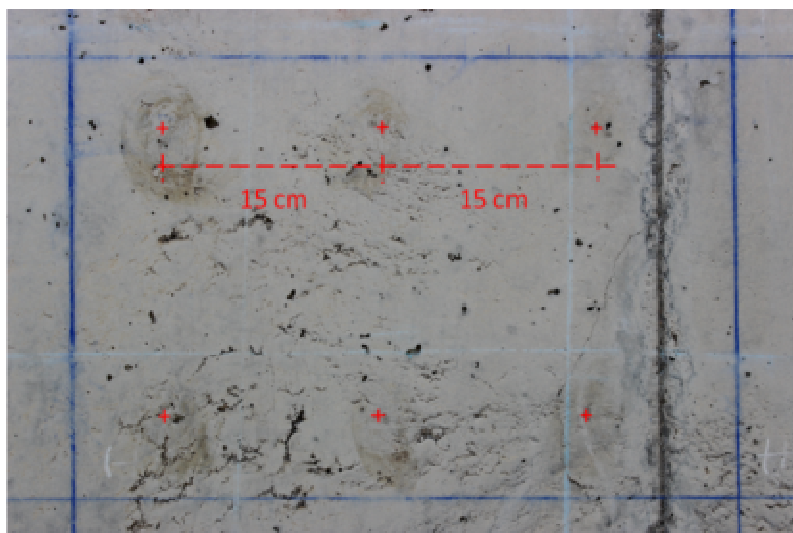


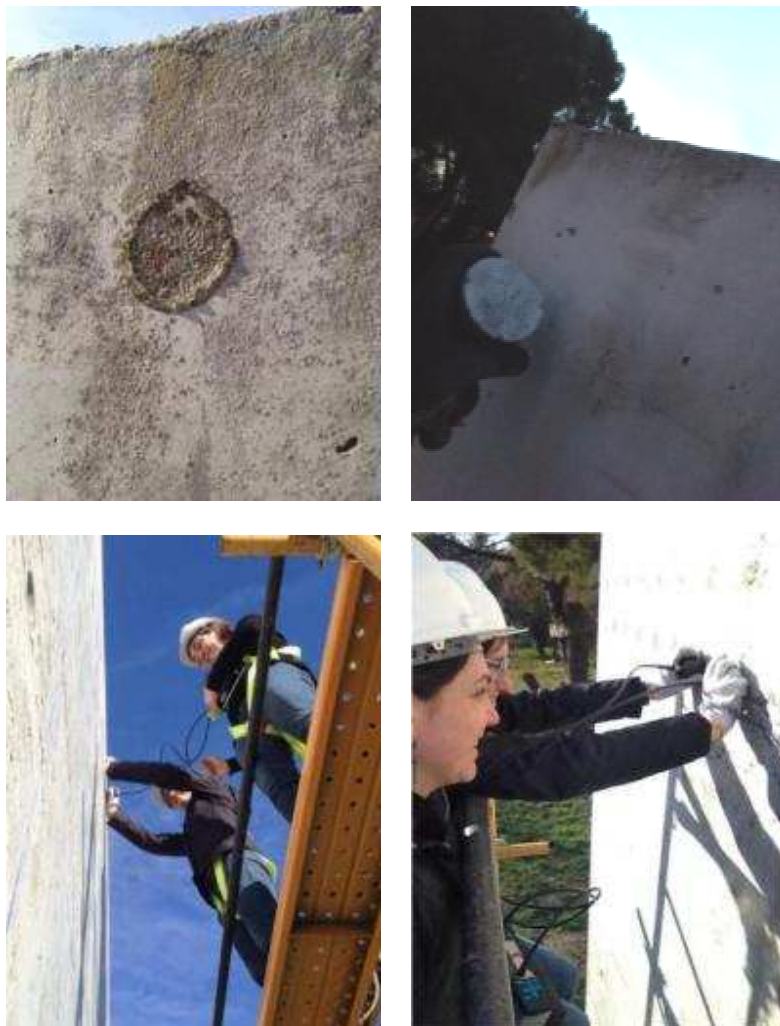
Imagen y elaboración Propia

Otro punto a destacar para la correcta ejecución fue a necesidad de remover suciedad o restos de microorganismo que se encontraban en la superficie del muro. Se utilizó la piedra abrasiva obtenida con el equipo del esclerómetro; este procedimiento es fundamental, ya que el acoplamiento de los transductores no era óptimo en zonas con demasiado polvo o erosionadas, por tanto la medición era poco fiable, o de plano no era captada por el equipo, desestimada y automáticamente arrojada como error de medición no válida. En las imágenes se puede apreciar la porosidad y textura variable presentadas en el borde superior del muro, provocada por la acción de microorganismos, la acumulación de suciedad y la erosión por escurrimiento de agua de lluvia. Luego de la limpieza realizada con piedra abrasiva, la superficie es lo bastante lisa y limpia como para proceder a la medición. Comprobar el correcto acoplamiento es fundamental, antes de enviar el pulso ultrasónico o la medición será invalidada.

Además fue importante contar con un ayudante permanente, ya que considerando las condiciones del emplazamiento donde se realizó el trabajo, no era factible sostener firmemente los transductores y a la vez mantener el equipo ubicado en posición estable mientras se envía el pulso ultrasónico. El equipo continúa enviando el pulso hasta considerar que la recepción es estable, por lo que cada pulso se mide en diferentes tiempos, esto dependerá de la calidad del hormigón de cada cuadrante, será tan amplia la variación de los tiempos



de medición obtenidos y registrados en la memoria del aparato.



Imágenes Propias

### Conclusiones Previas

Es posible afirmar que las mediciones con el equipo ultrasónico son de fácil ejecución, además el aparato permite un registro bastante fiable al estar configurado con errores posibles como recepciones demasiado débiles, o problemas de acoplamiento que invalidan la medición, de manera tal de no registrar una velocidad que pueda estar errada. Otro punto a favor es la calibración práctica y simple que se realiza antes de comenzar. Además, con tal solo conocer la bibliografía existente sobre el tema, es factible entender a pie de obra si un cuadrante esta dentro de los rangos normales.

En este estudio tenemos una gran variedad de velocidades registradas, que van desde la más baja con 574 m/s medida en el cuadrante A5, donde encontramos un hormigón muy poroso y con reparaciones de mala calidad en su superficie, como también existen mediciones sobre los 5.000 m/s hasta alcanzar los 10.000 m/s en el cuadrante I9, que también presenta una elevada resistividad, por sobre los 100 kΩcm.

En general los valores obtenidos son bastante irregulares, como lo es a simple vista el espécimen analizado. Como se ha comentado antes, la ejecución de un hormigón será determinante en su resultado final, un correcto diseño y dosificación no asegura obtener las resistencias deseadas. Es importante destacar que se realizaron 390 mediciones, 2 por cuadrante, y que entre ellas podían existir grandes variaciones, como por ejemplo el cuadrante G1 donde la medición de la

mitad superior es de 5.051 m/s y la medición de la velocidad superficial de la mitad inferior del cuadrante es de 1.442 m/s.

En las tablas a continuación se realiza una clasificación según los rangos estudiados anteriormente. Se puede evidenciar que cerca de la mitad del espécimen presenta velocidades por debajo del rango bueno / excelente de la clasificación, y que la otra mitad está muy por debajo, presentando un 16,7 % de clasificación “Muy Pobre”, lo cual es bastante preocupante.

CLASIFICACION DEL HORMIGON SEGÚN SU VELOCIDAD ULTRASONICA			
Velocidad Ultrasonica v (m/s)	Clasificación del hormigón	Espécimen (cantidad mediciones)	%
V>4575	Excelente	103	26,4
4575 > V > 3660	Bueno	88	22,5
3660 > V > 3050	Cuestionable	87	22,3
3050 > V > 2135	Pobre	47	12,1
V < 2135	Muy Pobre	65	16,7
total		390	100

#### CONCLUSION

Excelente / Bueno	(26,4 + 22,5)	48,9 %
Cuestionable / Pobre / Muy Pobre	(22,3+12,1+16,7)	51,1%

### 3.2.4. Esclerómetro

#### Antecedentes

La medición realizada en la superficie del hormigón con el conocido Martillo Schmidt conto con 6 puntos de referencia en cada cuadrante, aprovechando las marcas utilizadas para la medición de pulsos ultrasónicos. Como se mencionó en el capítulo anterior, es necesario repetir al menos 9 veces el rebote para registrar un numero cierto aceptable para el ensayo.

A reconocer la naturaleza extremadamente no homogénea de la superficie del espécimen, se decide que para dar un valor de rebote a cada cuadrante se registraran 6 valores y se promediarán entre ellos.

La ejecución se realiza de manera rápida y constante, siempre que se haya efectuado la correcta limpieza de las zonas a ensayar con la piedra abrasiva, de manera tal de golpear una superficie uniforme libre de erosiones o polvillo suelto. Cabe señalar que la medición fue realizada con el aparato en sentido horizontal, lo que será importante en el momento de relacionar con las curvas de resistencia a la compresión

Se conocen lugares en que existen reparaciones de mala calidad, por lo que son ensayados con mayor cantidad de rebotes evidenciando fallas sólo con el impacto del martillo.



### Conclusiones Previas

Se recogen datos generales de los promedios de los cuadrantes, donde se puede obtener la siguiente tabla resumen:

#### CLASIFICACION DEL HORMIGON SEGÚN SU VALOR DE REBOTE

VALOR DE REBOTE	N/mm <sup>2</sup> (aprox)	Espécimen (cantidad mediciones)	%
>50	50	2	1
45 > V > 50	45	25	12,9
40 > V > 45	38	109	55,9
35 > V > 40	30	56	28,7
V < 35	25	3	1,5
<b>total</b>		<b>195</b>	<b>100</b>

#### CONCLUSION

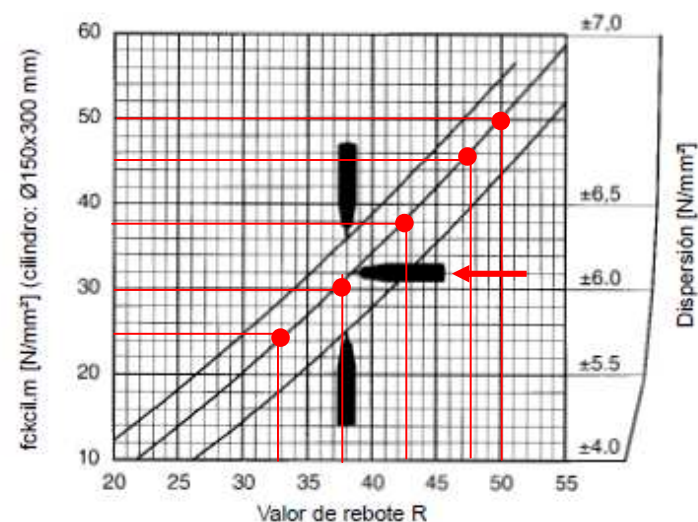
Promedio valor de rebote muro	41,48
Valor más bajo cuadrante J2	31,6
Valor más alto cuadrante G7	51,3

Según la información obtenida del diseño del espécimen anteriormente descrita en este capítulo, se requería una resistencia de 25 N/mm<sup>2</sup>.

Considerando este dato, podríamos decir que casi todos los cuadrantes se encuentran en un rango aceptable, ya que valores promedio de rebote de menos de 35 solamente encontramos en 3 cuadrantes.

De todas maneras es importante señalar que se registraron 3 valores de rebote bajo los 20, incluso de 16, en el borde inferior del muro, en el cuadrante A4, sin embargo, fue sacado de la muestra al ser realizado precisamente sobre una reparación que no resistió el impacto del martillo.

Finalmente el promedio general del valor de rebote del muro es de 41,48, lo que según la conversión de la tabla a disposición se consideraría como 35 N/mm<sup>2</sup>, este resultado se aprecia como un rango bastante comparable a la resistencia diseñada.



# 4. CARTOGRAFÍA

## Y CORRELACIÓN ENTRE MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

### 4.1. CARTOGRAFÍA GENERAL

Para lograr entender de una forma integral el conjunto de anomalías y defectos que afectan a esta estructura de hormigón armado, se realizarán diferentes cartografías indicativas de las condiciones anómalas encontradas mediante los diferentes métodos utilizados sobre el muro.

Se entenderá el muro como un plano dividido en 195 cuadrantes, a los cuales se les analizó metódicamente para extraer información referente de su condición actual. Se debe considerar que estas condiciones son acumulativas, y representan la sumatoria del paso del tiempo y las condiciones medio ambientales a las cuales estuvo expuesto desde su ejecución.

El objetivo de realizar estas cartografías es comprobar de qué forma se complementan cada uno de los métodos, para así poder concluir relaciones entre cada uno de ellos, además de esta forma se facilita la detección de zonas de mayor vulnerabilidad.

#### 4.1.1. Cartografía Detección Visual

Se comenzará con la cartografía de las principales anomalías encontradas mediante la inspección visual, estas se clasificaron en 4 grupos:

1. Fisuras
  - a. Producidas por retracción plástica o hidráulica.
  - b. Producidas por la corrosión expansiva de las armaduras.
2. Coqueras
  - a. Superficiales de pequeño tamaño.
  - b. Superficiales de gran tamaño con árido a la vista.
3. Humedad
  - a. Evidentes por manchas.
  - b. Generación de microorganismos.
4. Acciones externas
  - a. Desprendimiento.
  - b. Reparaciones defectuosas.

En la siguiente página se muestra la cartografía visual general de los defectos. Esta fue realizada metódicamente mediante la toma de fotografías individuales de cada uno de los cuadrantes, para luego reagruparlas a través de Photoshop, de manera que aseguramos una correcta resolución de cada pixel que conforma esta imagen, lo que ha permitido la detección visual de las anomalías durante el análisis y desarrollo de este trabajo de fin de máster.

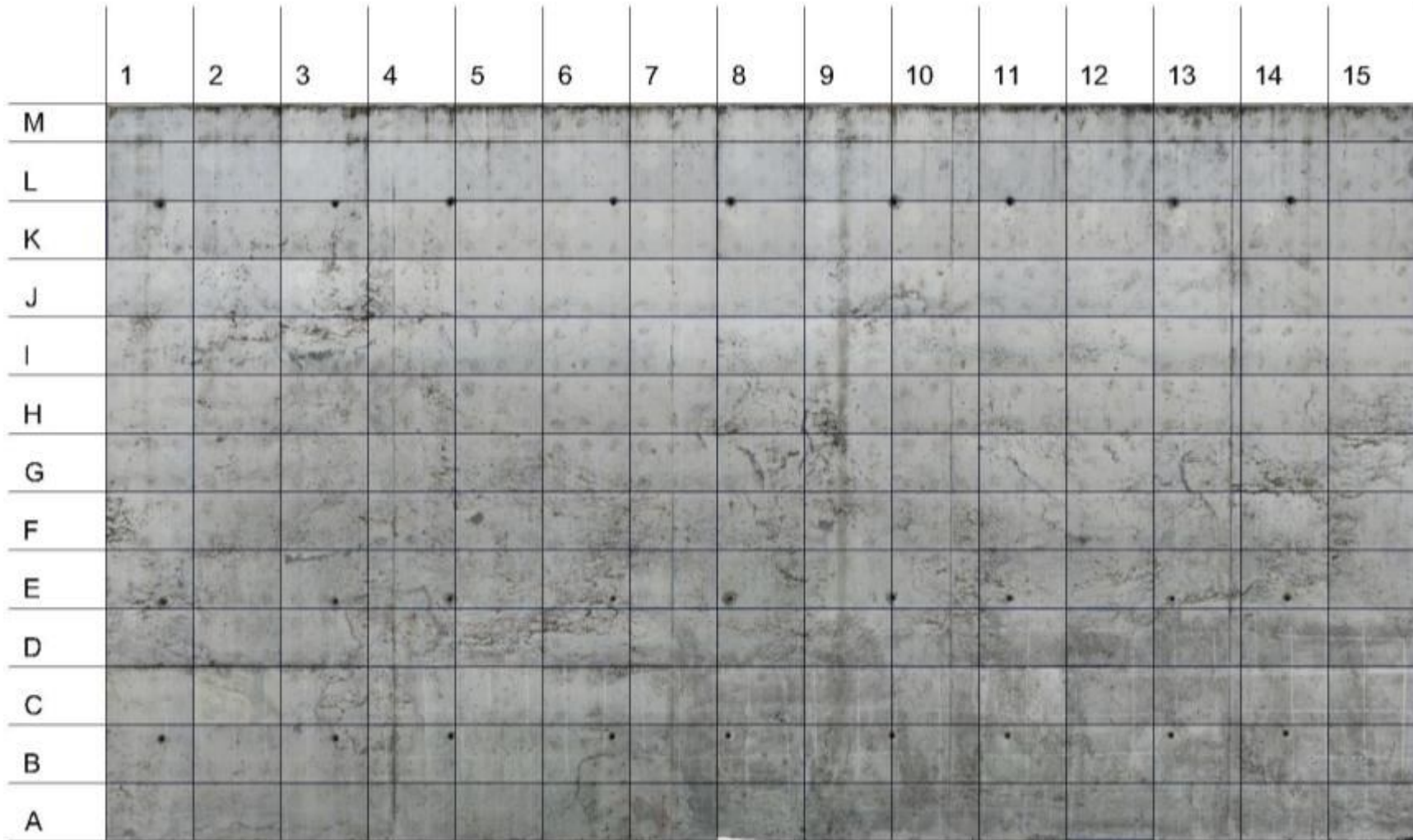
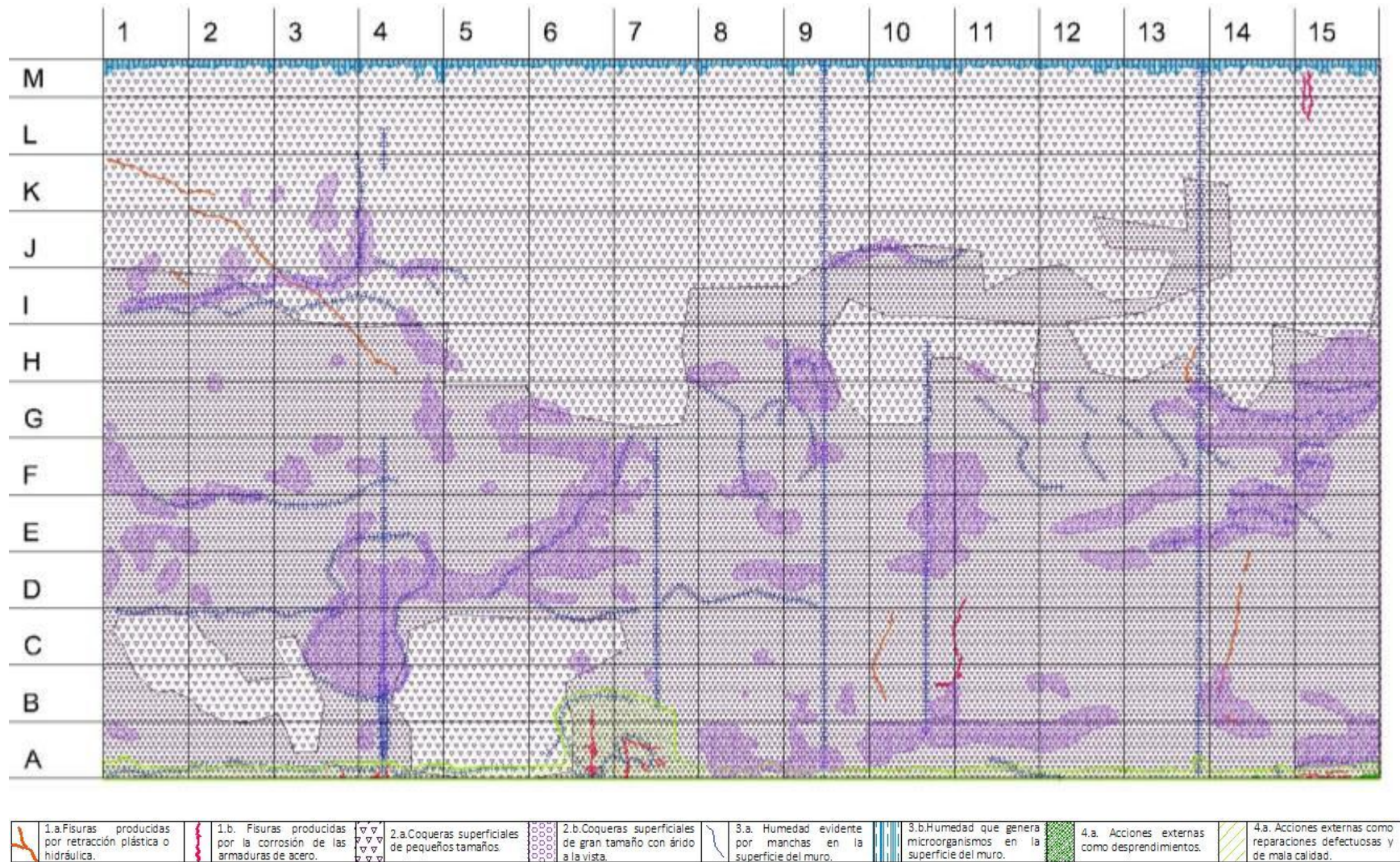


Imagen General del Muro analizado, destacando la separación por cuadrantes de 45 x 30 cm.





Cartografía Detección Visual General del espécimen de Hormigón Armado, donde se especifican defectos evidentes en la superficie.

En el capítulo de Anexos se pueden revisar las cartografías separadas por defecto.

<b>CARTOGRAFÍA DETECCIÓN VISUAL</b>			
<b>Defecto General</b>	<b>Defecto Especifico</b>	<b>Cantidad cuadrantes</b>	<b>%</b>
<b>FISURAS</b>	Producidas por retracción plástica o hidráulica.	15	7,7
	Producidas por la corrosión de las armaduras.	12	6,15
<b>COQUERAS</b>	Superficiales de pequeño tamaño.	195	100
	Superficiales de gran tamaño con árido a la vista.	95	48,7
<b>HUMEDAD</b>	Evidente por manchas.	93	47,7
	Generación de microorganismos.	15	7,7
<b>ACCIONES EXTERNAS</b>	Desprendimientos	2	1
	Reparaciones defectuosas.	17	8,7

Para realizar la cartografía de detección visual General anteriormente presentada, se decidió marcar mediante diferentes colores, las zonas que se ven afectadas en las fotografías, esto permite ubicar a simple vista la distribución de cada anomalía, entender cómo se superponen en cada cuadrante, para obtener claridad de las relaciones entre ellas.

Se puede evidenciar la presencia de defectos superficiales en toda la superficie del muro analizado, destacándose la presencia de coqueras de diversos tamaños, producto de una deficiente ejecución.

Existen coqueras que no dejan áridos a la vista que mayoritariamente son de pequeño tamaño, de todas maneras existen cuadrantes saturados de este defecto, lo que en sumatoria forman una superficie altamente porosa y vulnerable al ingreso de humedades.

Se pueden encontrar a la vez ambos tipos de coqueras en un mismo cuadrante, lo que en la cartografía se muestra como una superposición de colores violetas.

Al mismo tiempo la presencia de manchas de humedad, se presenta abarcando aproximadamente el 50% de los cuadrantes, con mayor fuerza en la mitad inferior y sobre el borde superior generando la proliferación de microorganismos.

Existe una relación entre la ubicación de las manchas de humedad y diferentes variables, como por ejemplo la existencia de humedades en lugares donde el encofrado ha dejado marcas, evidentes de una incorrecta puesta en obra, estas marcas han derivado a zonas porosas y erosionadas siendo nido de focos húmedos; en la cartografía se pueden ver líneas azules verticales casi perfectas, como en las columnas 4-7-10-13, u horizontales como entre la fila C-D.

Particularmente la marca de humedad de la columna 9 corresponde a un escurrimiento de agua desde el borde superior, lo que a simple vista se muestra como una mancha continua de aproximadamente 10 cm de ancho. Otra coincidencia es la de la humedad con las reparaciones deficientes, realizadas con algún tipo de mortero de cemento, donde se ha acumulado humedad entre el borde reparado y la unión con el hormigón existente, probablemente provocado por una ineficaz solución para dar continuidad a ambas terminaciones presentándose micro fisuras que comprometen la permeabilidad de la zona.

Finalmente la correlación entre humedad y fisuras provocadas por corrosión de la armadura de acero es evidente y al mismo tiempo la existencia de reparaciones defectuosas sobre estas fisuras.

Existen extremos de la armadura de acero oxidados, los cuales se presentan a menos de 1 centímetro de la superficie del espécimen, declarando la inexistencia en algunas zonas del recubrimiento mínimo exigido en proyecto para la estructura de acero. Como también es posible apreciar estas roturas en sentido vertical siguiendo la trayectoria del acero y con una profundidad y ancho superior a los 3-5 mm en específicas situaciones como en el cuadrante M15.

Si bien las Acciones Externas solamente se encuentran ubicadas en el 9,7% de los cuadrantes analizados, este tipo de defectos hablan de situaciones que ya han sido revisadas con

anterioridad, seguramente por su avanzado estado patológico, como es el caso de los cuadrantes, donde ya se ha decidido reparar, logrando probablemente solucionar el problema evidente del momento, pero desencadenando patologías concomitantes como humedades, nuevas fisuras, etc.

Del mismo modo, los cuadrantes que presentan desprendimientos, sugieren la vulnerabilidad del espécimen a continuar perdiendo masa en su borde inferior, como también refleja la avanzada fase de desadherencia entre materiales que esta sufriendo el hormigón, probablemente por acción de la humedad que se aloja en los poros excesivos de la superficie.

En los anexos podrá revisarse en detalle las cartografías separadas por defecto.

#### **4.1.2. Cartografía Resistividad Eléctrica**

Si bien en el capítulo anterior se ha realizado un análisis general de las resistividades encontradas en el espécimen de hormigón armado, en este apartado intentaremos resaltar la importancia de la ubicación específica desde donde fue tomada la muestra, para poder lograr hacer una correlación con los demás métodos.

Es importante recordar que existen dos valores “fuera de rango” al registrar mediciones sobre los 1000 k $\Omega$ cm, este es el caso de los cuadrantes A7 Y A11.



En la gráfica a continuación, se destaca en escala de grises los valores registrados desde el menor al mayor (k $\Omega$ cm). Es posible ver que la mayoría de las mediciones bajas se encuentran en las 3 filas superiores del muro. Mientras que los valores más altos se ubican en el tercio inferior, como también en filas de la zona media-alta del muro. Si bien la muestra es bastante variable, y existen cuadrantes muy próximos que presentan valores sobre los 100 k $\Omega$ cm y luego bajo los 20 k $\Omega$ cm, es posible considerar una constante en la cartografía, representando la zona superior del muro como la de mayores probabilidades de corrosión. Esto es deducible también porque la zona superior del muro es aquella que tiene mayor exposición a las lluvias, por tanto se moja más y los poros se encuentran mayormente saturados, siendo lo opuesto en la zona inferior, por lo que presenta valores superiores de resistividad (colores gris oscuro).

CLASIFICACION DE PROBABILIDAD DE CORROSION SEGÚN POLDER	
Resistividad	Clasificación
>100 k $\Omega$ cm	Riesgo de corrosión despreciable
50 a 100 k $\Omega$ cm	Riesgo de corrosión bajo
10 a 50 k $\Omega$ cm	Riesgo de corrosión moderado
<10 k $\Omega$ cm	Riesgo de corrosión alto

CLASIFICACION	CANT.	k $\Omega$ cm	COLOR
BAJA	54	8,9 – 39,6	
MEDIA BAJA	59	40,5 – 99,6	
MEDIA ALTA	53	103,2 – 299	
ALTA	29	304– 1130	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M	26	20,9	25,6	22,2	24	43,9	14,2	15,3	15,5	13,8	21,2	15,2	17	14,8	13,9
L	8,9	14,3	11,7	19,9	16,3	14,6	17,2	19,6	9,3	24,9	21,3	34,1	23,9	17,4	14,3
K	32,5	51,3	38,5	41,2	22,8	23,4	20,9	22,3	21,7	195,8	108,3	121,6	99,6	14,9	234
J	299	211	260	136,3	150,9	275	287	446	396	210	412	364	354	372	439
I	387	316	192,9	263	264	307	286	304	120,6	287	193,4	333	395	203	266
H	35,9	27,6	40,5	43,3	53,8	47,6	37	31,8	33	39,6	42,6	48,3	45,9	40,5	103,8
G	28,7	33,2	60,9	69,4	65,1	56,6	35,8	28,5	59	42,7	53,3	49,9	71,2	98	113,1
F	22,2	38,4	68,3	70,9	48,2	67,2	64,1	54,7	33,1	48,4	55,3	73,5	76,3	40,8	55,4
E	38,6	45,7	51,6	65,5	68,4	141,6	53,1	45,6	35,5	78,3	130,6	167,6	146,9	58,5	94,3
D	33,2	45,4	53,4	54,8	103,2	98,5	104,1	61,5	62,4	84,1	61	86,4	42,1	47,8	71,3
C	195,5	653	379	178,3	772	350	291	289	274	319	299	471	421	122,3	869
B	160,3	481	111,5	113	156,5	192,4	369	182,7	409	105	490	284	271	248	447
A	28,7	87,6	54,7	51,3	61,7	183,8	1130	157,3	355	279	1035	202	150,1	150,3	235

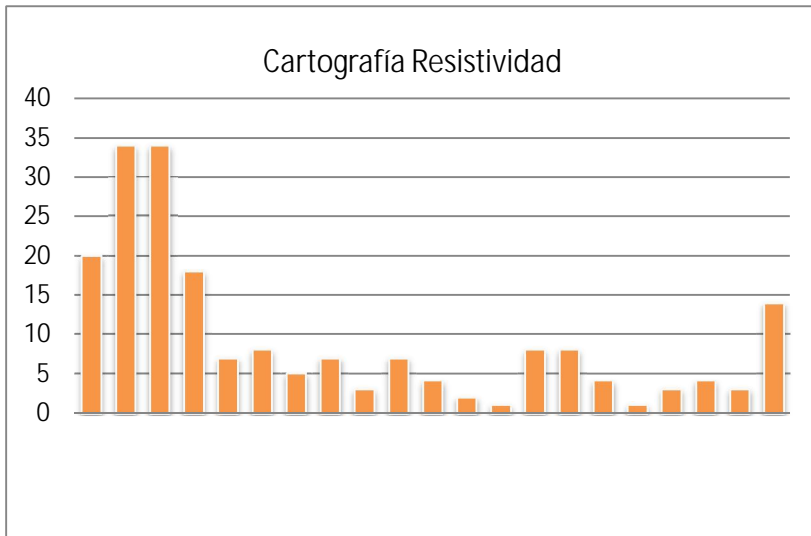


La muestra de datos no arroja una distribución normal, ya que la mayor cantidad de registros no se encuentra dentro de la mediana de la muestra, si no que se distribuye hacia los extremos, coincidiendo con la distribución espacial dentro del muro.

El mínimo valor registrado es de 8,9 kΩcm, cuadrante L1.

El máximo valor registrado es de 1130 kΩcm, cuadrante A7.

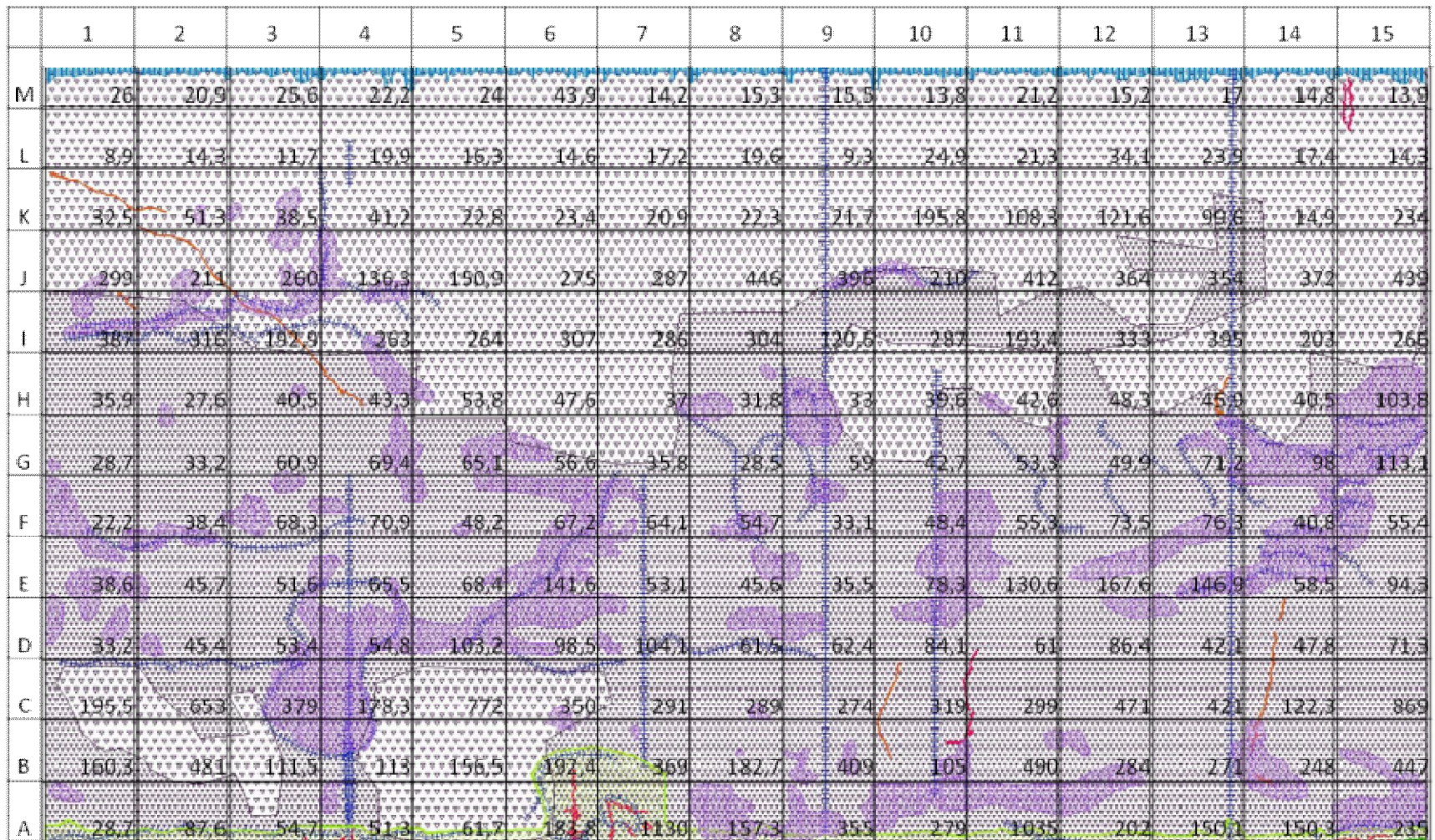
El valor promedio de la muestra es de 148 kΩcm.



La mayor cantidad de registros se encuentra en los siguientes rangos: 20-40 , 40-60 , 0-20 , 60-80 , 400- más. Sin embargo, la muestra arroja parcialidades entre los valores de 80 y de los 400 kΩcm, lo que hace variar el promedio a 148 kΩcm donde

podríamos deducir que el espécimen analizado no presentaría probabilidades de corrosión, lo que es una conclusión absolutamente errada, ya que las zonas superiores tienen rangos con altas posibilidades de corrosión. Esto nos hace entender que la cartografía mediante este método es necesariamente independiente de un punto con el otro. Imposible de ser generalizado.

En la siguiente página se puede ver una superposición de los valores registrados de resistividad eléctrica con la cartografía visual de lesiones detectada, donde es posible evidenciar relaciones entre las zonas de menor resistividad con la existencia de microorganismos ubicados en el borde superior, lo que sin duda es originado por la presencia de altos grados de humedad constantes, lo que sugiere una alta saturación de los poros superficiales, que por tanto permiten conducir la electricidad arrojada en el ensayo. Del mismo modo es posible reconocer que en la zona inferior, donde se agrupa gran parte de las mediciones de resistividad alta o media alta, existen reparaciones realizadas con algún tipo de mortero muy poco poroso, lo que estaría evitando la conductividad de la masa del hormigón, al no poseer poros que se saturan de líquido, a pesar de presentar coqueas de diversos tamaños. Del mismo modo, las filas I – J que también agrupan valores altos de resistividad, presentan coqueas superficiales, pero controladas, sin áridos vistos a diferencia de la zona inmediatamente inferior donde se concentra este defecto y agrupa los valores medio bajo y bajo del ensayo de resistividad.



	1.a.Fisuras producidas por retracción plástica o hidráulica.		1.b. Fisuras producidas por la corrosión de las armaduras de acero.		2.a.Coqueas superficiales de pequeños tamaños.		2.b.Coqueas superficiales de gran tamaño con árido a la vista.		3.a. Humedad evidente por manchas en la superficie del muro.		3.b.Humedad que genera microorganismos en la superficie del muro.		4.a. Acciones externas como desprendimientos.		4.a. Acciones externas como reparaciones defectuosas y de mala calidad.
---	--	---	---	---	--	---	--	---	--	---	---	---	---	---	---

Cartografía detección visual superpuesta a valores de Resistividad Eléctrica.



### 4.1.3. Cartografía Ultrasonido

En la cartografía que se muestra a continuación, las mayores velocidades de ultrasonido registradas se ubican desde la Fila E hacia arriba, contrastando con las velocidades menores que se ubican en la zona inferior del muro, con excepción del cuadrante A1 (7212 m/s) y A9 (4651 m/s). Esto confirma la heterogeneidad de la composición de la masa de hormigón, donde es evidente la segregación de sus materiales, constatando grandes variaciones en la velocidad de la propagación de la onda ultrasónica, generando encuentros entre cuadrantes como el L3 con 687 m/s y el L5 con 6849 m/s. La velocidad de ultrasonido habla de superficies lo suficientemente densas para transmitir una onda ultrasónica, pero no descarta que esta superficie se encuentre además saturada de agua.

CLASIFICACION DEL HORMIGON SEGÚN SU VELOCIDAD ULTRASONICA																
v (m/s)	Tipo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V > 4575	Excelente	M 4054	2814	1875	4298	3282	2530	4559	3151	4425	3304	4348	3171	1517	3226	3138
4575 > V > 3660	Bueno	L 1502	3268	687	4559	6849	4464	6787	4747	4399	4918	4425	1738	1374	3425	3086
3660 > V > 3050	Cuestionable	K 1150	9900	4381	4068	5017	4685	3779	4806	6266	5068	4917	4612	2479	4569	4393
3050 > V > 2135	Pobre	J 3330	2100	2015	4473	4407	5000	5051	3378	3345	5211	4729	4967	4821	1322	4885
V < 2135	Muy Pobre	I 7177	2412	2799	4286	4532	3386	3233	3304	5017	4615	3488	3667	3521	4438	4155
		H 4286	4854	4967	1834	4886	4478	4673	4545	5034	5455	5102	4951	3268	5415	3827
		G 1442	4304	4775	4243	3330	5086	3798	4459	6750	4699	4598	4967	5440	3685	4655
		F 4598	4967	4569	4714	4821	4917	4420	721	4555	4583	4626	4917	3631	3667	4685
		E 3180	4598	4744	3445	4869	3322	2797	2872	4420	3264	4473	4641	3462	3713	3207
		D 1469	2372	3207	4125	1743	1897	4381	2395	2912	2250	3527	2207	2619	2240	3100
		C 3293	3445	3271	3511	4160	4219	3544	1977	2274	2253	2260	1625	2496	2015	4068
		B 2628	3808	4280	4541	3587	1999	1889	1540	4355	857	2071	1676	2012	2867	1333
		A 7212	3363	4381	1533	1469	2430	1969	2086	4641	3867	2274	2900	3414	3414	1962

CLASIFICACION	CANT.	(m/s)	COLOR
BAJA	49	687 – 2.797	
MEDIA BAJA	49	2.799 – 3.779	
MEDIA ALTA	49	3.798 – 4.615	
ALTA	48	4.626 – 9.900	

De todas maneras podemos decir que la muestra de ultrasonidos si puede considerarse como una distribución normal, ya que como se muestra en el grafico adjunto la mayor cantidad de registros se ubica dentro del área cercana la mediana, lo que representa el 72,8% de las muestras realizadas, estos son valores entre 2332 m/s y 5068 m/s.

El mínimo valor registrado es de 687 m/s, cuadrante L3.

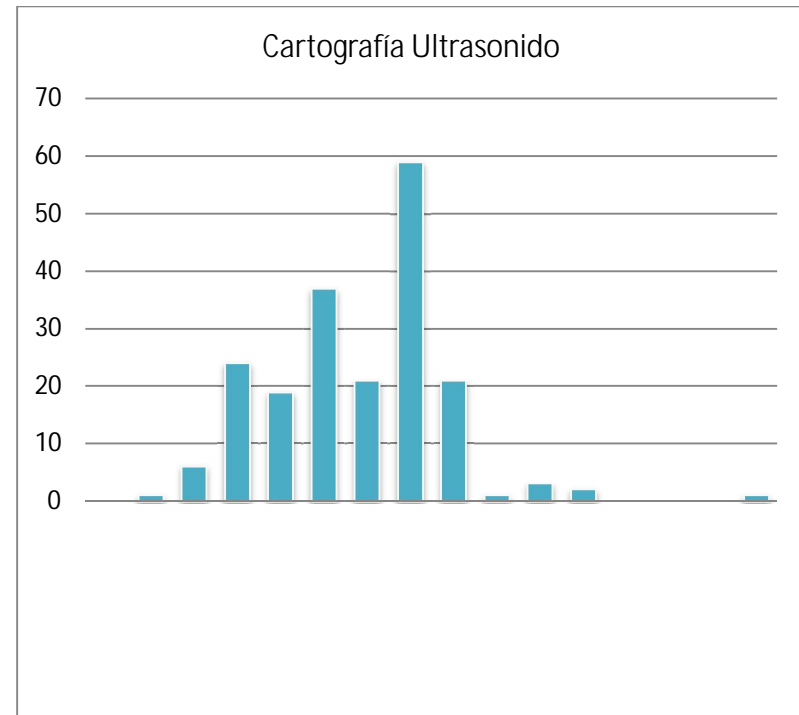
El máximo valor registrado es de 9900 m/s, cuadrante K2.

El valor promedio de la muestra es de 3700 m/s.

La desviación estándar es de 1368 m/s aproximadamente.

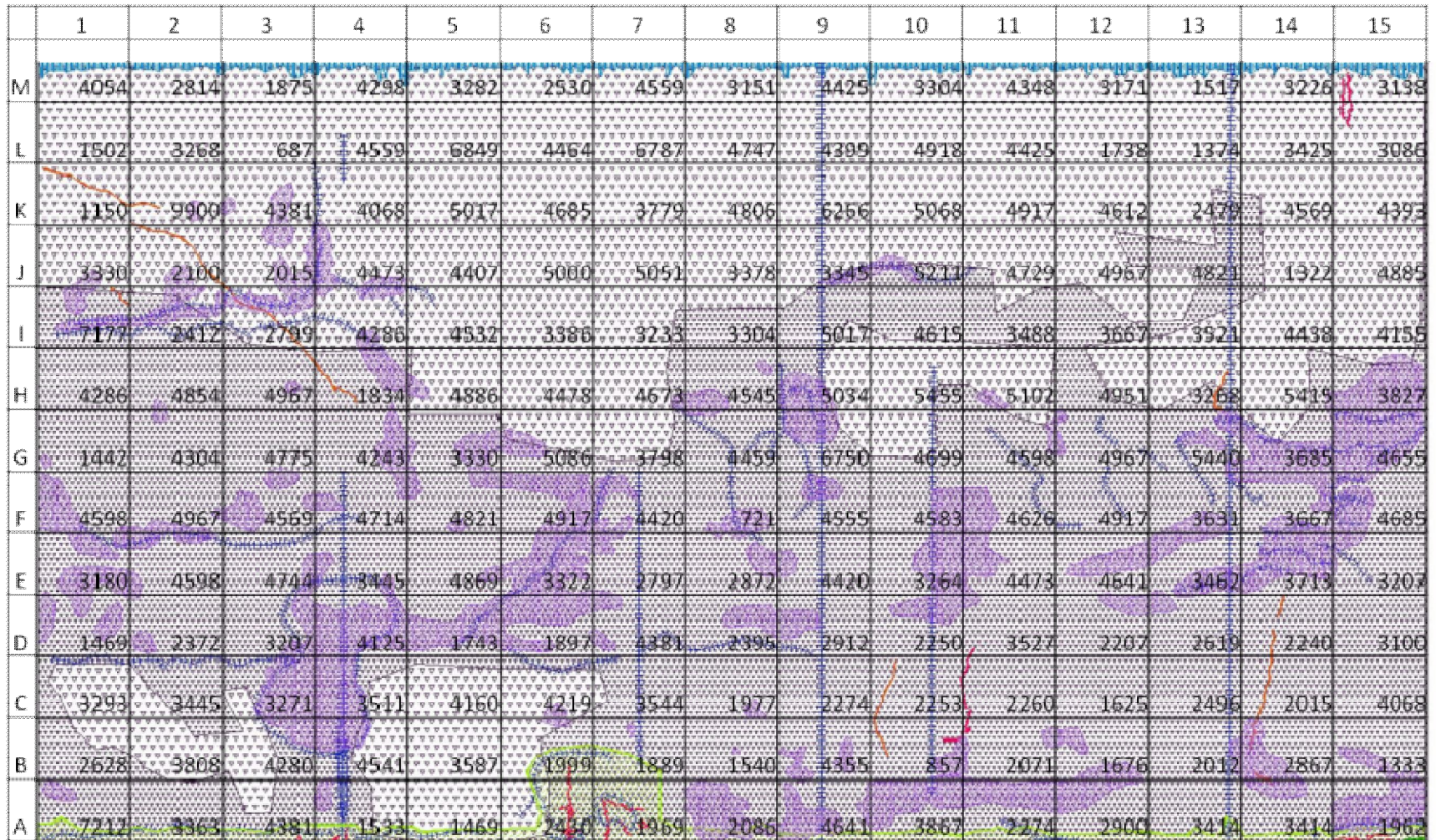
Es destacable la diferencia de entre el mínimo y máximo valor registrado, lo que da una variación mayor a un ratio de 1/14. Sin duda se confirma una heterogeneidad de la superficie que no es recomendable.

En la siguiente pagina se superpone la Cartografía de Detección Visual junto con los valores registrados de Velocidad Ultrasónica, es posible reconocer que las velocidades son tan variables como la cantidad de defectos registrados, especialmente las velocidades tendieron a subir en las zonas donde solo se encontraba un solo tipo de defecto, como las coqueas de menor tamaño, entre las Filas J – K y las Columnas 4 – 12, siempre presentando excepciones. Del mismo modo, las velocidades tienden a disminuir en aquellas zonas donde se muestra superposición de varias anomalías, como el caso del



área comprendida entre las Filas inferiores del muro, encontrando, coqueas de diferentes tamaños, áridos a la vista, manchas de humedad, pequeñas fisuras, etc., de todas maneras siempre presentando excepciones. Tales como la registrada en el cuadrante A1 con una velocidad alta de 7212 m/s, probablemente influenciada por la presencia de mortero de reparación que como se comento anteriormente es muy poco poroso y denso, lo que genera una mejor transmisión de la onda ultrasónica.





Cartografía detección visual superpuesta con Velocidades Ultrasónicas.



#### 4.1.4. Cartografía Esclerómetro

Si bien, como se explicó en el capítulo precedente, los valores de esclerómetro están en un buen rango según la resistencia inicial de diseño del muro, y la tabla de conversión para conocer la resistencia a la compresión de la superficie ensayada; se puede registrar un área donde los más altos valores se agrupan, esto es aproximadamente el centro del espécimen analizado, lo que refleja una zona de mayor continuidad a la resistencia a la compresión. Los valores más bajos están algo más segregados, sin embargo, llama la atención el borde inferior, donde se han realizado reparaciones con morteros de cemento donde no sabemos su resistencia ni fiabilidad de ejecución, que son inferiores al promedio de la muestra, sin estar por debajo de la resistencia requerida por cálculo que es de 25N/mm<sup>2</sup>.

CLASIFICACION DEL HORMIGON SEGÚN SU VALOR DE REBOTE		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VALOR DE REBOTE	N/mm <sup>2</sup> (aprox)	M 40,00	41,33	39,33	42,67	41,33	40,67	39,33	39,33	36,67	40,00	40,00	40,67	40,00	39,33	38,67
>50	50	L 40,67	42,00	42,67	39,33	38,67	42,00	38,33	40,33	40,00	41,67	39,00	37,00	36	36,67	40,00
45 > V > 50	45	K 42,00	39,67	43,67	38,33	40,33	41,00	42,67	38,33	39,33	37,00	34,66	35,66	38,00	36,33	37,33
40 > V > 45	38	J 38,67	31,66	37,67	39,00	40,33	42,67	39,33	40,00	44,00	38,67	44,67	43,00	45,00	42,33	40,33
35 > V > 40	30	I 49,33	44,00	39,67	45,00	44,00	44,67	44,67	45,33	44,00	44,00	45,33	43,33	42,33	41,67	43,33
V < 35	25	H 41,67	45,00	45,67	43,00	43,67	44,33	44,00	43,67	42,67	41,00	43,00	41,00	39,00	44,00	37,67
		G 42,33	44,67	45,33	43,33	42,00	44,67	51,33	44,33	38,00	46,00	43,00	38,33	42,33	41,67	37,33
		F 41,33	43,67	45,33	50,33	46,33	46,33	43,33	46,66	49,66	46,33	41,67	46,00	40,67	40,00	41,33
		E 41,67	45,00	43,33	49	44,67	42,67	45,67	49,66	42,67	36,67	38,67	43,00	39,67	38,33	36,67
		D 40,00	44,67	49,66	41,33	42,33	42,00	41,00	44,67	42,67	42,67	45,33	42,33	44,67	42,00	40,67
		C 43,00	43,33	45,00	36	42,67	38,33	40,33	39,33	40,00	40,33	41,00	44,67	43,33	42,00	41,33
		B 36,33	42,67	40,00	36	40,33	37,67	37,67	39,33	40,67	38,33	40,67	38,67	43,00	37,33	41,00
		A 43,00	38,33	43,00	44,33	36,67	36,67	33	45,67	35,33	36,33	36,33	37,67	43,00	46	41,67

CLASIFICACION	CANT.	VALOR DE REBOTE	COLOR
BAJA	47	31,67 – 39	
MEDIA BAJA	49	39,33 – 41,33	
MEDIA ALTA	52	41,67 – 43,67	
ALTA	47	44 – 51,33	

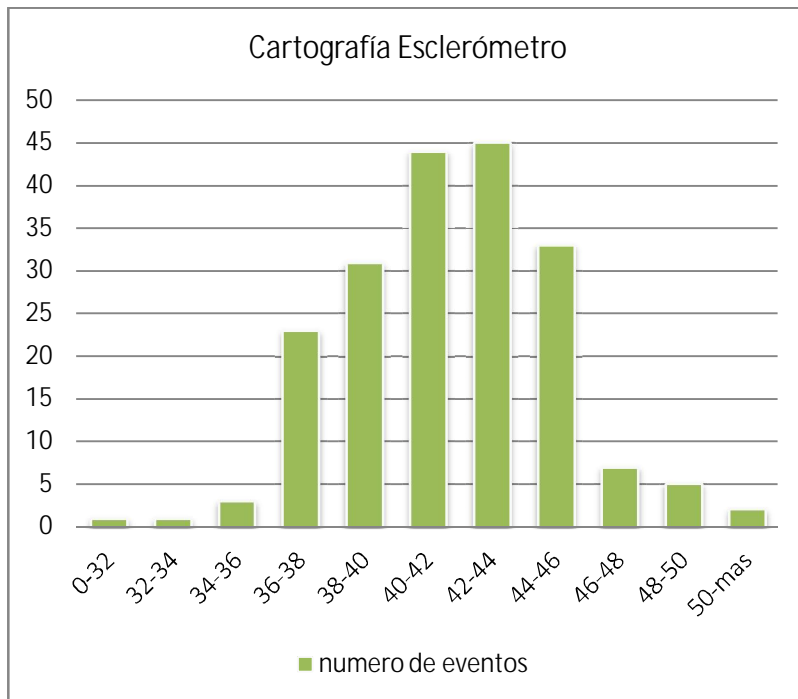
Los valores de rebote obtenidos durante las pruebas, tienen una distribución normal, considerando que más del 60% están alrededor de la media, entre los valores de 36 y 44.

El mínimo valor registrado es de 31,67, cuadrante J2.

El máximo valor registrado es de 51,33, cuadrante G7.

El valor promedio de la muestra es de 41,49.

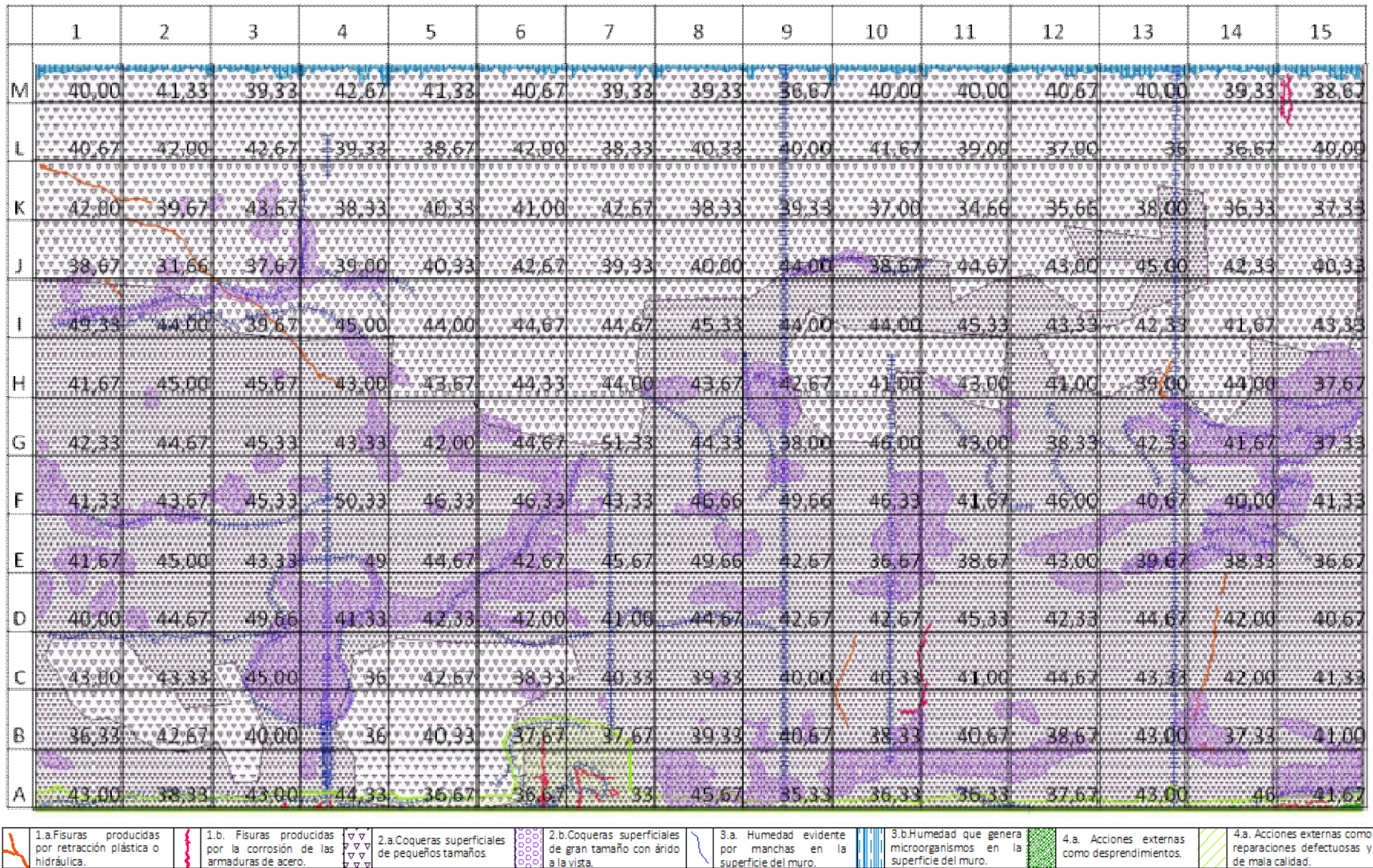
La desviación estándar es de 3,32 aproximadamente.



Finalmente en la página siguiente podemos ver una superposición de la Cartografía de detección visual con los valores de rebote que en la distribución de esta coinciden los valores más bajos con la ubicación de los morteros de reparación del borde inferior, como también la existencia de coqueas de diferentes tamaños.

En el centro del muro, entre las Filas E – I es donde se concentran los valores superiores, es aquí también donde se puede ver mayor cantidad de áridos vistos, los que pueden influir en el valor de rebote de la superficie, ya que el ensayo pudo haber sido realizado sobre alguno de estos o en su defecto aunque no sea evidente a primera vista, se deduce que la zona presenta segregaciones de áridos superficiales que claramente endurecen el área. Áridos que por lo demás, presentan dimensiones superiores a las especificadas por calculo para el diseño de la mezcla de hormigón, donde el tamaño de árido aceptable debe ser inferior a 20 mm, con un recubrimiento de 3,5 cm.





Cartografía detección visual superpuesta con Valores de Rebote.

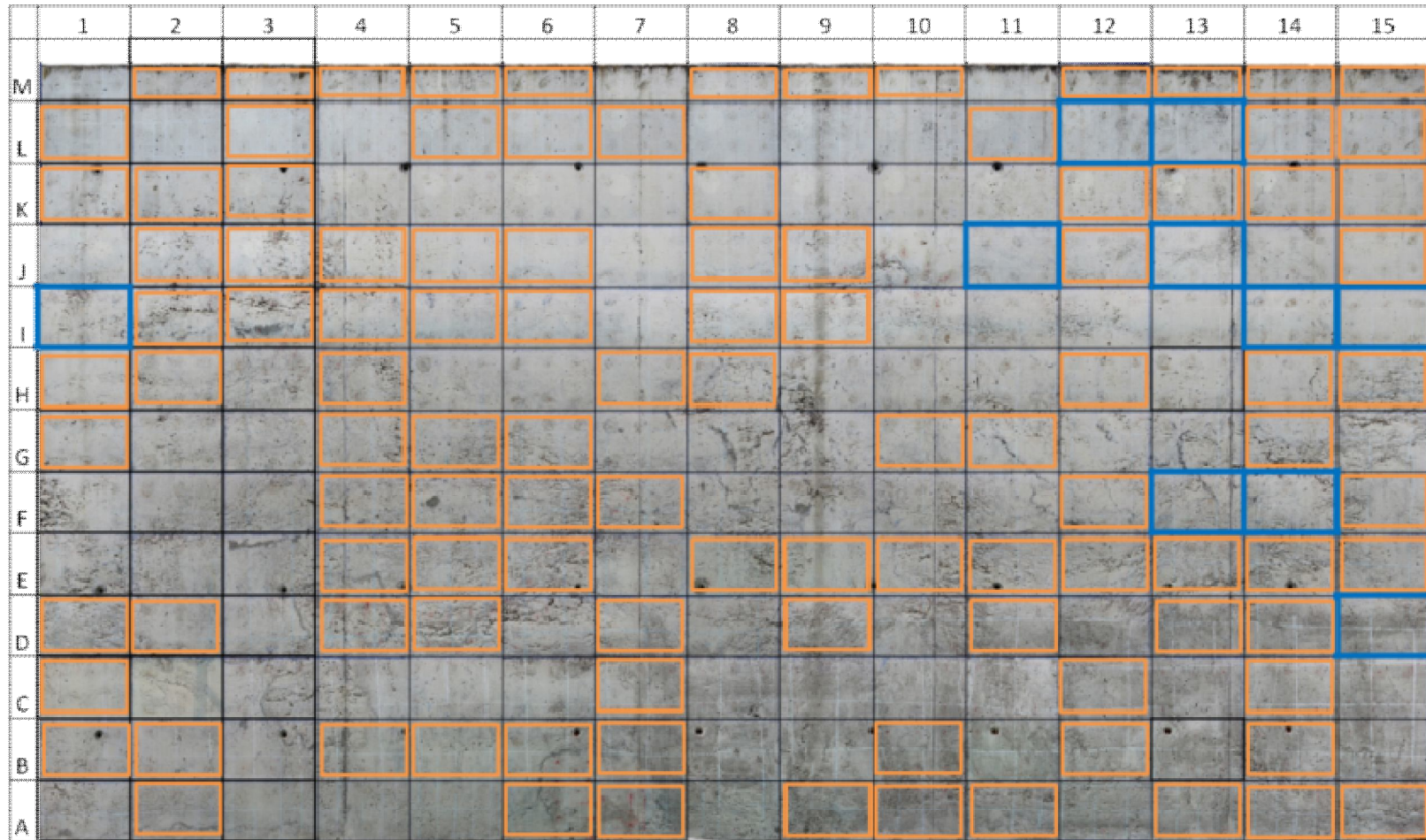
## 4.2. RELACIONES SINCRÓNICAS ENTRE MÉTODOS

Finalmente, se revisará la posible relación sincrónica que tienen los resultados obtenidos con los diferentes métodos no destructivos de medición utilizados. Para esto se han reunido, los datos registrados en una única tabla, de la cual se rescatarán aquellos cuadrantes que contienen coincidencias según la clasificación por color que se explicó anteriormente, la que está dividida en 4 cuadrantes de tonos grises. De esta manera tendremos aquellos que tienen 3 coincidencias, 2 coincidencias o ninguna. La primera columna corresponde a los valores de velocidad de ultrasonido, la segunda columna a los valores de rebote registrados con esclerómetro y la tercera columna a los valores de resistividad eléctrica. Con color azul se han marcado aquellos que encontramos con 3 coincidencias de color. Con color naranja se marcaron aquellos que tienen 2 coincidencias de color.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M	4.054 40 26	2.814 41 21	1.875 39 26	4.298 43 22	3.282 41 24	2.530 41 44	4.559 39 14	3.151 39 15	4.425 37 16	3.304 40 14	4.348 40 21	3.171 41 15	1.517 40 17	3.226 39 15	3.138 39 14
L	1.502 41 9	3.268 42 14	687 43 12	4.559 39 20	6.849 39 16	4.464 42 15	6.787 38 17	4.747 40 20	4.399 40 9	4.918 42 25	4.425 39 21	1.738 37 34	1.374 36 24	3.425 37 17	3.086 40 14
K	1.150 42 33	9.900 40 51	4.381 44 39	4.068 38 41	5.017 40 23	4.685 41 23	3.779 43 21	4.806 38 22	6.266 39 22	5.068 37 196	4.917 35 108	4.612 36 122	2.479 38 100	4.569 36 15	4.393 37 234
J	3.330 39 299	2.100 32 211	2.015 38 260	4.473 39 136	4.407 40 151	5.000 43 275	5.051 39 287	3.378 40 446	3.345 44 396	5.211 39 210	4.729 45 412	4.967 43 364	4.821 45 354	1.322 42 372	4.885 40 439
I	7.177 49 387	2.412 44 316	2.799 40 193	4.286 45 263	4.532 44 264	3.386 45 307	3.233 45 286	3.304 45 304	5.017 44 121	4.615 44 287	3.488 45 193	3.667 43 333	3.521 42 395	4.438 42 203	4.155 43 266
H	4.286 42 36	4.854 45 28	4.967 46 41	1.834 43 43	4.886 44 54	4.478 44 48	4.673 44 37	4.545 44 32	5.034 43 33	5.455 41 40	5.102 43 43	4.951 41 48	3.268 39 46	5.415 44 41	3.827 38 104
G	1.442 42 29	4.304 45 33	4.775 45 61	4.243 43 69	3.330 42 65	5.086 45 57	3.798 51 36	4.459 44 29	6.750 38 59	4.699 46 43	4.598 43 53	4.967 38 50	5.440 42 71	3.685 42 98	4.655 37 113
F	4.598 41 22	4.967 44 38	4.569 45 68	4.714 50 71	4.821 46 48	4.917 46 67	4.420 43 64	721 47 55	4.555 50 33	4.583 46 48	4.626 42 55	4.917 46 74	3.631 41 76	3.667 40 41	4.685 41 55
E	3.180 42 39	4.598 45 46	4.744 43 52	3.445 49 66	4.869 45 68	3.322 43 142	2.797 46 53	2.872 50 46	4.420 43 36	3.264 37 78	4.473 39 131	4.641 43 168	3.462 40 147	3.713 38 59	3.207 37 94
D	1.469 40 33	3.372 45 45	3.207 50 53	4.125 41 55	1.743 42 103	1.897 42 99	4.381 41 104	2.395 45 62	2.912 43 62	2.250 43 84	3.527 45 61	2.207 42 86	2.619 45 42	2.240 42 48	3.100 41 71
C	3.293 43 196	3.445 43 653	3.271 45 379	3.511 36 178	4.160 43 772	4.219 38 350	3.544 40 291	1.977 39 289	2.274 40 274	2.253 40 319	2.260 41 299	1.625 45 471	2.496 43 421	2.015 42 122	4.068 41 869
B	2.628 36 160	3.808 43 481	4.280 40 112	4.541 36 113	3.587 40 157	1.999 38 192	1.889 38 369	1.540 39 183	4.355 41 409	857 38 105	2.071 41 490	1.676 39 284	2.012 43 271	2.867 37 248	1.333 41 447
A	7.212 43 29	3.363 38 88	4.381 43 55	1.533 44 51	1.469 37 62	2.430 37 184	1.969 33 1.130	2.086 46 157	4.641 35 355	3.867 36 279	2.274 36 1.035	2.900 38 202	3.414 43 150	3.414 46 150	1.962 42 235
3 COINCI-DENCIAS	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	2
2 COINCI-DENCIAS	7	8	11	8	11	9	7	6	6	5	5	8	4	8	8
SIN COINCI-DENCIAS	5	5	2	5	2	4	6	7	7	8	7	4	6	3	3
TOTAL	10	5,12%													
TOTAL	111	56,92%													
TOTAL	74	37,96%													

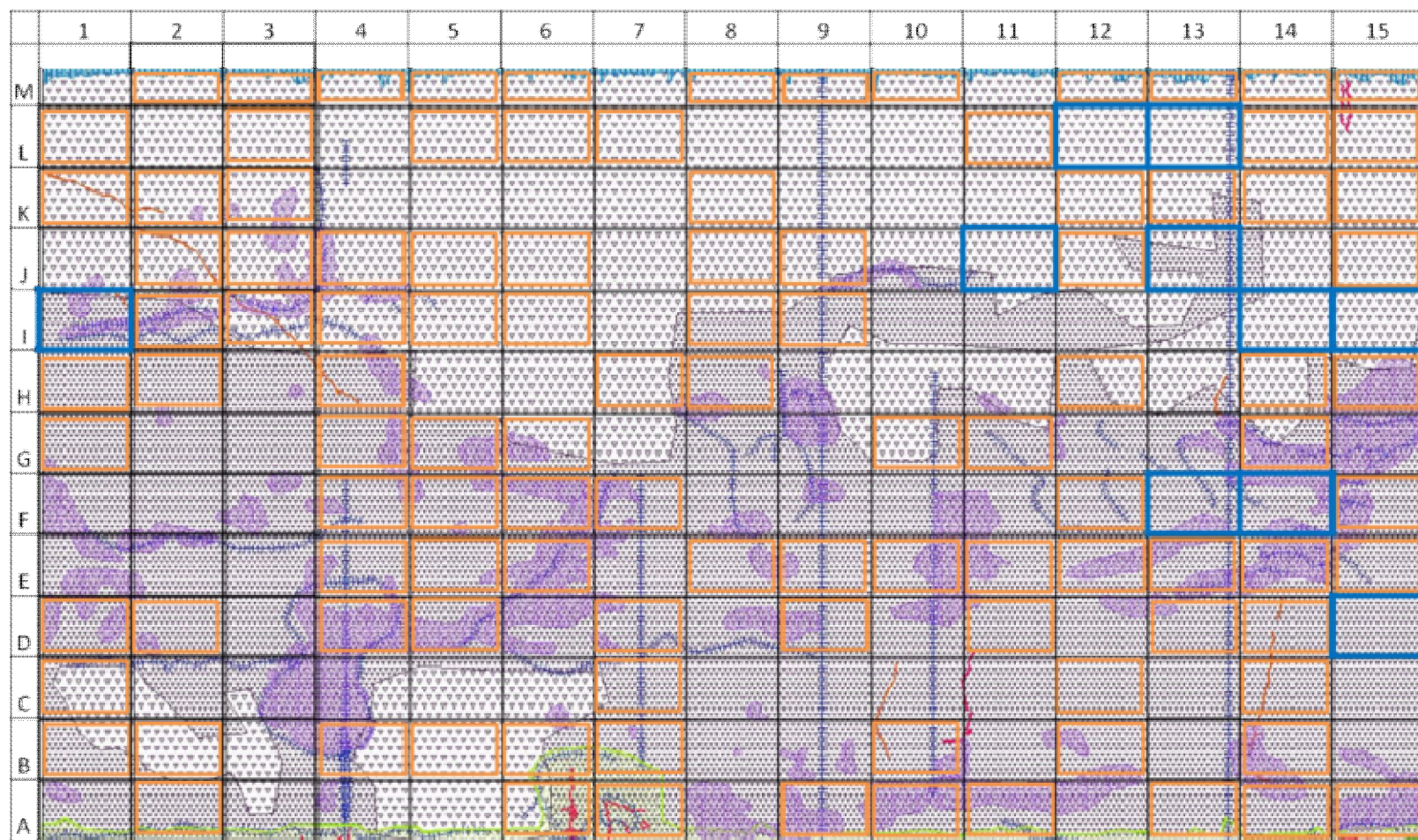
A modo de resumen se puede decir que aquellos que presentan 3 coincidencias, 3 son valores altos, 2 presentan valores medios altos, 3 tienen valores medios bajos y 2 tienen valores bajos según las mediciones realizadas.





Al superponer la imagen general del muro analizado, se puede apreciar la distribución de aquellos cuadrantes que presentan coincidencias, ubicándose mayoritariamente en el borde derecho aquellos que presentan 3 coincidencias, salvo el cuadrante I1, como también se puede ver que aquellos cuadrantes que tienen 2 coincidencias (color naranja) marcan aquellas zonas que presentan mayor coexistencias de defectos.





En esta cartografía de detección visual, al sobreponerla con la ubicación de los cuadrantes que presentan coincidencias se puede apreciar que la mayoría de estos con 2 coincidencias se ubican en cuadrantes que presentan defectos simultáneos como humedades, coqueras, áridos vistos, microorganismos como es el caso del borde superior o reparaciones como en el borde inferior del muro. Son menos los cuadrantes señalados que se ubiquen en zonas regulares, o con solo 1 defecto, como las comprendidas entre las columnas 5 – 7 y las filas I – L, por ejemplo.

Los cuadrantes de 2 coincidencias, tienen la siguiente distribución:

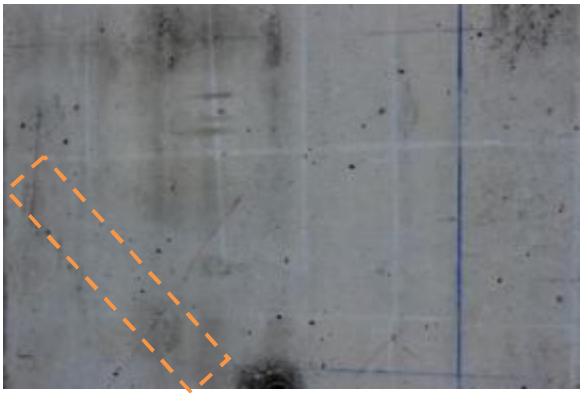
CLASIFICACION	BAJA	MEDIA BAJA	MEDIA ALTA	ALTA	TOTAL	PORCENTAJE
Velocidad Ultrasónica/ Resistividad Eléctrica	9	10	12	5	36	32,44%
Velocidad Ultrasónica/ Valor de Rebote	12	12	11	14	49	44,14%
Resistividad Eléctrica/ Valor de Rebote	8	5	7	6	26	23,42%
TOTAL	29	27	30	25	111	
PORCENTAJE	26,13%	24,33%	27,02%	22,52%		100%

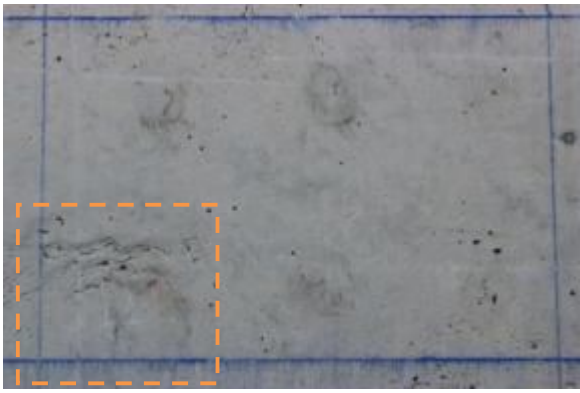
Podemos decir que existe mayor relación entre los ensayos de Velocidad Ultrasónica con los de Rebote, sumando 49 coincidencias de 111, lo que representa el 44,14% del total de coincidencias, resaltando la distribución casi equivalente entre mediciones bajas, medias bajas, medias altas y altas.

Por debajo, esta la relación de la Velocidad Ultrasónica con la Resistividad Eléctrica con 32,44% del total, nuevamente de forma pareja entre los cuadrantes de clasificación de tonos grises, exceptuando la medición más alta, solo con 5 coincidencias.

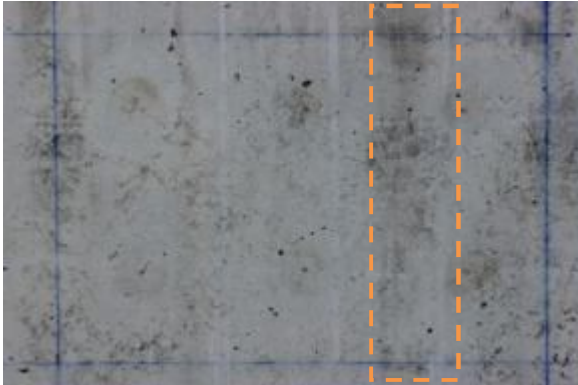
Finalmente la relación entre Resistividad Eléctrica y Rebote representa solo el 23,42% de los registros, que de todas maneras se distribuyen más o menos de manera homogénea.


Para terminar el análisis de relaciones sincrónicas entre métodos se ha decidido analizar uno a uno los cuadrantes que presentan 3 coincidencias, representado por 10 cuadrantes los cuales constituyen sólo el 5,12% de la muestra, de manera de entender cómo se complementan los métodos utilizados sobre el espécimen de hormigón armado.

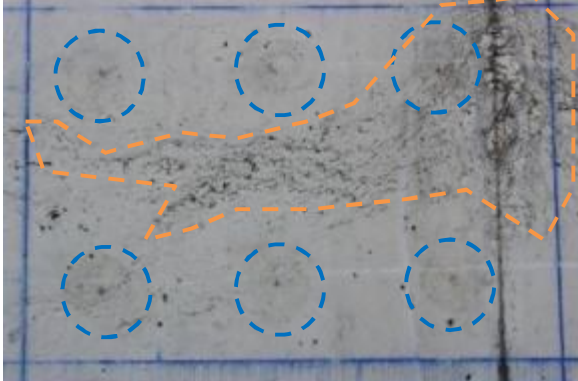
CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES	
I1		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos más altos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una alta velocidad ultrasónica habla de un hormigón bastante denso, clasificado con una calidad excelente, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 45 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica alta lo que permite deducir un riesgo de corrosión despreciable para las estructuras de acero en el interior del espécimen.</p> <p>Visualmente se aprecia una superficie muy regular, casi sin la existencia de coqueas, solo se evidencia una fisura probablemente debido a la retracción del cemento, lo que se acerca a lo proyectado y esperado para este proyecto de hormigón visto.</p>	
		Velocidad Ultrasónica (m/s)	7.177
		Valor de Rebote	49
Tipo	3 Coincidencias Rango Alto	Resistividad Eléctrica (kΩcm)	387

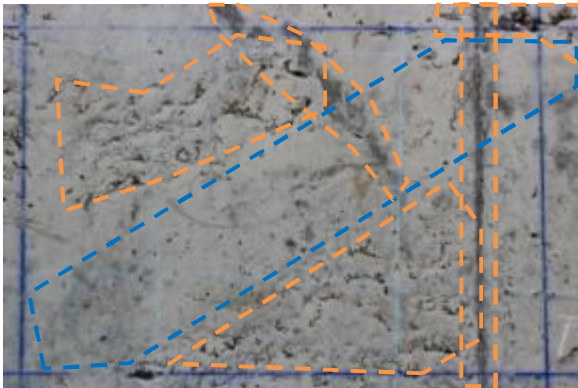
CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES	
J11		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos más altos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una alta velocidad ultrasónica habla de un hormigón bastante denso, clasificado con una calidad excelente, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 45 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica alta lo que permite deducir un riesgo de corrosión despreciable para las estructuras de acero en el interior del espécimen.</p> <p>Visualmente se aprecia una superficie muy regular, casi sin la existencia de coqueas, solo se evidencia una escorrentía en la esquina inferior izquierda, donde se puede ver manchas de humedad y concentración de coqueas superficiales.</p>	
		Velocidad Ultrasónica (m/s)	4.729
		Valor de Rebote	45
Tipo	3 Coincidencias Rango Alto	Resistividad Eléctrica (kΩcm)	412

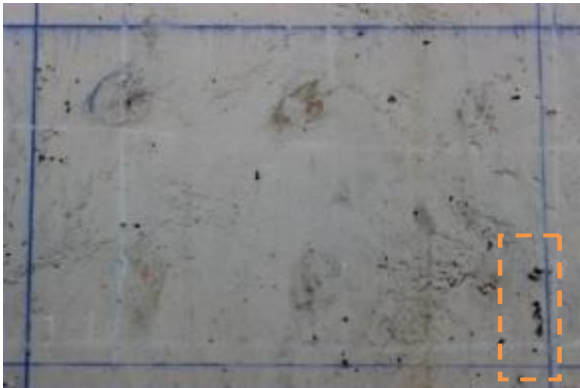


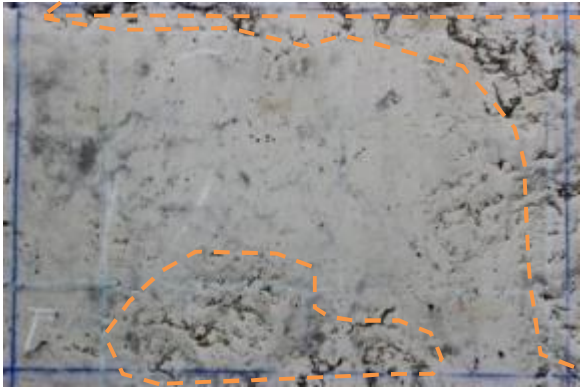
CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES				
L12		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos más bajos de cada uno de los ensayos. Por lo que podríamos señalarlo como vulnerable.</p> <p>Una baja velocidad ultrasónica habla de un hormigón bastante poco denso, clasificado con una calidad muy pobre, sin embargo, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 30 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote, lo cual no es malo en términos estructurales y una resistividad eléctrica baja lo que permite deducir un riesgo de corrosión moderado para las estructuras de acero en el interior del espécimen. Visualmente se aprecia una superficie irregular, con existencia de coqueas, además se puede apreciar manchas de humedad escurrida desde el borde superior del muro. Sin embargo, no se aprecia una superficie lo bastante porosa como podría deducirse por su baja velocidad ultrasónica, es posible inducir que exista riesgo de fisuras o bolsas de aire en la capa subsuperficial que no se evidencian a simple vista, pero que sí es detectada mediante ultrasonido.</p>				
		<table border="1"> <tr> <td>Velocidad Ultrasónica (m/s)</td> <td>1.734</td> </tr> <tr> <td>Valor de Rebote</td> <td>37</td> </tr> </table>	Velocidad Ultrasónica (m/s)	1.734	Valor de Rebote	37
Velocidad Ultrasónica (m/s)	1.734					
Valor de Rebote	37					
Tipo	3 Coincidencias Rango Bajo	<table border="1"> <tr> <td>Resistividad Eléctrica (kΩcm)</td> <td>34</td> </tr> </table>	Resistividad Eléctrica (kΩcm)	34		
Resistividad Eléctrica (kΩcm)	34					


CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES				
L13		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos más bajos de cada uno de los ensayos. Por lo que podríamos señalarlo como vulnerable.</p> <p>Una baja velocidad ultrasónica habla de un hormigón bastante poco denso, clasificado con una calidad muy pobre, sin embargo, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 30 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote, lo cual no es malo en términos estructurales y una resistividad eléctrica baja lo que permite deducir un riesgo de corrosión moderado para las estructuras de acero en el interior del espécimen. Visualmente se aprecia una superficie irregular, con existencia de coqueas y suciedad, además se puede apreciar en la esquina superior derecha la presencia de un defecto mayor, con manchas de humedad, microfisuras y la marca de encofrado donde se ha acumulado humedad. Sin embargo, no se aprecia una superficie lo bastante porosa como podría deducirse por su baja velocidad ultrasónica, es posible inducir que exista riesgo de fisuras o bolsas de aire en la capa subsuperficial que no se evidencian a simple vista, pero que sí es detectada mediante ultrasonido.</p>				
		<table border="1"> <tr> <td>Velocidad Ultrasónica (m/s)</td> <td>1.374</td> </tr> <tr> <td>Valor de Rebote</td> <td>36</td> </tr> </table>	Velocidad Ultrasónica (m/s)	1.374	Valor de Rebote	36
Velocidad Ultrasónica (m/s)	1.374					
Valor de Rebote	36					
Tipo	3 Coincidencias Rango Bajo	<table border="1"> <tr> <td>Resistividad Eléctrica (kΩcm)</td> <td>24</td> </tr> </table>	Resistividad Eléctrica (kΩcm)	24		
Resistividad Eléctrica (kΩcm)	24					

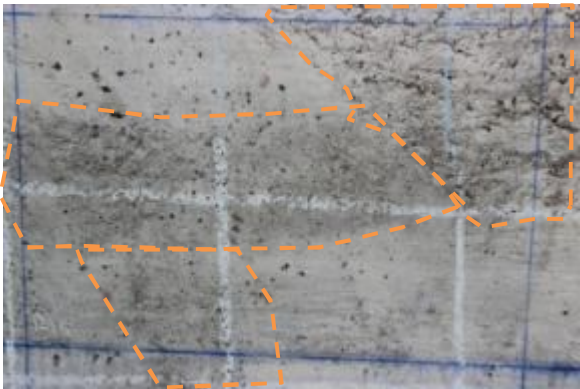
CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES	
J13		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos más altos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una alta velocidad ultrasónica habla de un hormigón bastante denso, clasificado con una calidad excelente, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 45 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica alta lo que permite deducir un riesgo de corrosión despreciable para las estructuras de acero en el interior del espécimen.</p> <p>Visualmente se aprecia una superficie muy irregular, con un defecto de escorrentía que muestra manchas de humedad, desde el encuentro de encofrado que si es una zona afectada. Sin embargo, las zonas inmediatamente adyacentes a este defecto, presentan una superficie regular, casi sin coqueas, lo que explicaría la alta velocidad, al mostrarse como una zona poco porosa, precisamente donde fueron realizadas las mediciones de ultrasonido (marcas azules). Esto lleva a destacar un margen de error en la muestra, donde claramente el registro es demasiado puntual, a pesar de haber reducido los cuadrantes a áreas de 45 x 30 cm.</p>	
		Velocidad Ultrasónica (m/s)	4.821
		Valor de Rebote	45
		Resistividad Eléctrica (kΩcm)	354
Tipo	3 Coincidencias Rango Alto		

CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES	
F13		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos medios bajos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una velocidad ultrasónica, clasificada con una calidad cuestionable, con una resistencia a la compresión buena de aproximadamente 38 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica que permite deducir un riesgo de corrosión bajo para las estructuras de acero en el interior del espécimen.</p> <p>Visualmente se aprecia una superficie muy irregular, con defectos de escorrentía que muestra manchas de humedad, en el encuentro de encofrado y en la zona superior del cuadrante, además se muestra bastante porosa salvo en la diagonal marcada con color azul. Este es un cuadrante poco coherente, ya que a simple vista parece ser de alta vulnerabilidad, sin embargo, los ensayos arrojan valores aceptables, a pesar de encontrarse entre aquellos medios bajos de la muestra general del espécimen.</p>	
		Velocidad Ultrasónica (m/s)	3.631
		Valor de Rebote	41
		Resistividad Eléctrica (kΩcm)	76
Tipo	3 Coincidencias Rango Medio Bajo		

CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES	
I14		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos medios altos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una velocidad ultrasónica, clasificada con una calidad buena, evidentemente poco porosa y densa, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 38 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica que permite deducir un riesgo de corrosión despreciable para las estructuras de acero en el interior del espécimen. Visualmente se aprecia una superficie regular, con algunos defectos de coqueras en la esquina inferior derecha, pero que en general su aspecto luce sano, tal como lo indican los valores registrados en los ensayos con métodos no destructivos.</p>	
		Velocidad Ultrasónica (m/s)	4.438
Tipo	3 Coincidencias Rango Medio Alto	Valor de Rebote	42
		Resistividad Eléctrica (kΩcm)	203

CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES	
F14		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos medio bajo de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una velocidad ultrasónica, clasificada con una calidad buena, pero en el límite de ser cuestionable, según las tablas de conversión explicadas anteriormente, evidentemente se muestra porosa y con defectos que como coqueras que permiten visibilizar el árido de la mezcla, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 30 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica que permite deducir un riesgo de corrosión moderado para las estructuras de acero en el interior del espécimen. Visualmente se aprecia una superficie muy irregular, y vulnerable a la saturación de sus poros, además de manchas de humedad en las superficies aparentemente sanas de coqueras y de aspecto denso y liso. Se puede deducir que a pesar de no contar con valores deficientes, la probabilidad de que se asiente en este cuadrante la humedad y genere anomalías no es absolutamente descartada para un futuro próximo.</p>	
		Velocidad Ultrasónica (m/s)	3.667
Tipo	3 Coincidencias Rango Medio Bajo	Valor de Rebote	40
		Resistividad Eléctrica (kΩcm)	41

CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES						
I15		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos medios altos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una velocidad ultrasónica, clasificada con una calidad buena, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 38 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica que permite deducir un riesgo de corrosión despreciable para las estructuras de acero en el interior del espécimen.</p> <p>Visualmente se aprecia una superficie muy regular y aparentemente lisa, salvo la esquina inferior izquierda donde existe presencia de pequeñas coqueras.</p> <p>Se puede concluir que la imagen se corresponde a los valores registrados, ya que su aspecto no induce a deducir ningún defecto, más bien es de los pocos cuadrantes que presentan una terminación según lo especificado y deseado para el proyecto.</p>						
		<table border="1"> <tr> <td>Velocidad Ultrasónica (m/s)</td> <td>4.155</td> </tr> <tr> <td>Valor de Rebote</td> <td>43</td> </tr> <tr> <td>Resistividad Eléctrica (kΩcm)</td> <td>266</td> </tr> </table>	Velocidad Ultrasónica (m/s)	4.155	Valor de Rebote	43	Resistividad Eléctrica (kΩcm)	266
Velocidad Ultrasónica (m/s)	4.155							
Valor de Rebote	43							
Resistividad Eléctrica (kΩcm)	266							
Tipo	3 Coincidencias Rango Medio Alto							

CUADRANTE	IMAGEN	OBSERVACIONES						
D15		<p>En este cuadrante podemos encontrar que coinciden valores ubicados en los rangos medios bajos de cada uno de los ensayos.</p> <p>Una velocidad ultrasónica, clasificada con una calidad cuestionable, con una resistencia a la compresión de aproximadamente 38 N/mm<sup>2</sup>, según la prueba de rebote y una resistividad eléctrica que permite deducir un riesgo de corrosión bajo para las estructuras de acero en el interior del espécimen.</p> <p>Visualmente se aprecia una superficie muy irregular, con presencia de coqueras de variadas dimensiones, en la esquina superior derecha áridos vistos, en el centro una mancha de humedad horizontal, sobre una superficie muy erosionada y porosa. Si bien los valores registrados no son preocupantes hasta este momento, se puede predecir una alta vulnerabilidad al ingreso de cloruros a través de los poros evidentes de la superficie, afectando el hormigón y deteriorándolo en un futuro, por lo tanto, disminuyendo valores en próximas mediciones no destructivas con los métodos utilizados.</p>						
		<table border="1"> <tr> <td>Velocidad Ultrasónica (m/s)</td> <td>3.100</td> </tr> <tr> <td>Valor de Rebote</td> <td>41</td> </tr> <tr> <td>Resistividad Eléctrica (kΩcm)</td> <td>71</td> </tr> </table>	Velocidad Ultrasónica (m/s)	3.100	Valor de Rebote	41	Resistividad Eléctrica (kΩcm)	71
Velocidad Ultrasónica (m/s)	3.100							
Valor de Rebote	41							
Resistividad Eléctrica (kΩcm)	71							
Tipo	3 Coincidencias Rango Medio Bajo							

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. CONCLUSIONES GENERALES Y ESPECÍFICAS

1. Para comenzar con las conclusiones generales de este Trabajo de Fin de Máster, podemos decir, que las técnicas no destructivas ciertamente son un método eficaz y económico para la inspección general y local de amplios elementos de hormigón armado para detectar zonas vulnerables donde aplicar posteriormente otros tipos de métodos más invasivos, si es necesario; además se puede entregar información considerada como fehaciente del estado de la estructura en un momento concreto. Es eficaz, por ser de rápida visualización de resultados y económica al no representar más inversión que los equipos por una sola vez, luego la utilización puede realizarse constantemente sin invertir nuevamente.
2. Son métodos de fácil y rápido uso, tanto práctico como de reconocimiento de datos, al poder visualizar a pie de obra los resultados, lo que significará en definitiva un ahorro de tiempo considerable si lo comparamos con ensayos realizados en laboratorio, lo que se traducirá en tomas de decisiones certeras y rápidas para la mantención, por ejemplo.
3. Son métodos seguros para el usuario, en ningún caso podríamos considerar peligro durante un correcto funcionamiento, por lo demás no generan residuos más que los utilizados para la limpieza de las superficies, los cuales no son ni tóxicos ni contaminantes.
4. La tecnología de los equipos empleados viene codificada para dar alerta de errores de medición, por tanto hace de las muestras un registro seguro y fiable, donde el factor humano está controlado. Además las anotaciones son automatizadas, evitando errores en el traspaso de datos.
5. Es importante considerar el correcto uso de los equipos según lo recomendado por los fabricantes, sobre todo en lo relacionado a la limpieza de las superficies estudiadas, como así también a la consideración de la ubicación de las barras de acero dispuestas dentro del hormigón, de manera de tener control sobre los factores externos a la muestra.
6. Si bien los métodos no destructivos utilizados presentan evidentes ventajas por sobre los destructivos, que requieren catas para analizar en laboratorios, esto no descarta la importante relación y compatibilidad para complementar y corroborar resultados entre ambos métodos de evaluación. Se ha visto que a pesar de realizar la muestra de la forma más



óptima, en un área de 195 cuadrantes, se presentan algunas incongruencias donde no es posible determinar la causante sin comprobar en laboratorio si efectivamente en esta zona existe una patología mayor que ha sido detectada o si esto fue error de ejecución.

7. Sin duda la oportunidad que se presenta en el uso de este tipo de métodos no destructivos es la posibilidad de realizar periódicamente evaluaciones y diagnósticos que permitan estar al tanto de la evolución de las condiciones de la estructura y así asegurar acciones oportunas para la correcta mantención de estas. Además puede dar aviso de posibles deficiencias que necesiten correcciones urgentes.
8. La experiencia y práctica constante en la toma de mediciones hará del experto capaz de diferenciar variaciones casuales ambientales sobre aquellas que presentan peligros para la durabilidad de la construcción, según la literatura revisada, por ejemplo, una acentuada baja de velocidad ultrasónica puede indicar un posible fallo estructural, como una grieta, que deberá ser corregido.
9. Se puede concluir que la evaluación mediante el uso de resistividad eléctrica se encuentra bastante bien valorado en cuanto a técnica y fiabilidad en la aplicación, además presenta la posibilidad de

diagnosticar la capacidad de un hormigón de transportar agentes agresivos como los iones de cloruro en su interior, reflejando así las posibilidades de corrosión, estos serán datos fundamentales para un seguimiento continuo hacia una mantención adecuada. Estos datos tendrán variaciones según el contenido de humedad que contengan los poros de la superficie, es importante considerar los días de lluvia y la ubicación de la muestra, ya que habrán zonas que estarán más vulnerables y podría verse abultada la medición, otros factores serán la temperatura, la permeabilidad y la composición del hormigón, estructurando así una línea de diagnóstico clara y eficaz.

10. Gracias a la documentación estudiada se ha podido entender que la durabilidad y probabilidades de corrosión de las armaduras del hormigón no están directamente relacionadas con la resistencia a la compresión que este tenga. Ya que lo que lo determinará será la estructura interna de los productos de hidratación, específicamente de los poros y la relación intersticial de estos en la zona interfacial del elemento estructural, comprendida entre la superficie del árido y la pasta de cemento. Por lo que podemos tener hormigones de similar o igual resistencia pero con diferentes grados de permeabilidad.



Esto puede en ocasiones desligar entre sí los resultados de los valores de rebote obtenidos con esclerómetro con los valores de resistividad eléctrica, ya que no siempre son directamente proporcionales entre un valor y otro. Por ejemplo, el ensayo de rebote registra en el cuadrante L1, un valor de 41, lo que indica, según la curva de conversión una resistencia a la compresión de  $38\text{N/mm}^2$ , aproximadamente, pero puede ser un tipo de hormigón poroso con una resistividad eléctrica de  $9\text{ k}\Omega\text{cm}$  reflejando una alta probabilidad de corrosión del acero interior.

O por el contrario el cuadrante A7 registra valores de resistividad eléctrica muy altos (desbordamiento superior a  $1000\text{ k}\Omega\text{cm}$ ), donde visiblemente existe una reparación con un mortero muy poco poroso, donde se registró una humedad cercana al 3%, sin embargo, la resistencia a la compresión según el valor de rebote fue de 33, es decir,  $25\text{ N/mm}^2$  y una velocidad de onda ultrasónica de 1969, considerando como muy pobre el hormigón en esta área.

11. Otra conclusión específica que se desprende de los ensayos es la importancia de la calidad y espesor de la capa de recubrimiento del hormigón armado, tomando en cuenta que los métodos utilizados registran justamente lo que está ocurriendo en esta superficie, que claramente no es la que determinará ni la

resistencia a la compresión ni la resistencia a la tracción de la estructura, por lo tanto, la importancia de generar un recubrimiento a las barras con un hormigón correctamente ejecutado e hidratado durante su etapa de curado, dará superficies poco porosas con disminución de las relaciones internas entre ellos y que así no permitirán el ingreso de agentes agresivos. La permeabilidad será determinante en el proceso de durabilidad del hormigón.

Apuntando esta conclusión al ensayo de resistividad eléctrica, este sí se podría considerar como un buen indicador para generar planes de mantenimiento de una estructura.

Sin embargo, el ensayo con esclerómetro pretende medir la resistencia a la compresión mediante un valor de rebote realizado superficialmente, lo que desvirtúa el resultado real de la capacidad a la compresión que tiene la estructura en su integridad, necesitando por lo tanto, comprobación en laboratorio con acciones sobre zonas más profundas.

Del mismo modo, el ultrasonido nos indica un daño superficial en la capa de recubrimiento, una densidad o porosidad que permiten calificar como hormigón pobre o resistente una superficie, lo que será útil para detectar la vulnerabilidad ante los mismos agentes agresivos ya mencionados anteriormente, de todas maneras tal como lo indica la normativa vigente

respecto a este tipo de ensayos, son referenciales, y deben comprobarse en laboratorio. Sin duda aportan información relevante para definir el lugar desde donde se tomará la muestra que será analizada posteriormente en laboratorio.

12. Finalmente es importante recalcar que estos tipos de ensayos no destructivos, son una fotografía del momento en que se realizaron, considerando las condiciones climáticas del momento, como humedad y temperatura, nada puede asegurar que estas condiciones se mantengan por un cierto periodo de tiempo, si no que más bien es mucho más probable que las condiciones del hormigón sigan cambiando y no sean las mismas, producto del paso del tiempo, de las influencias del medio y por qué no de algún evento inesperado como esfuerzos extremos, producidos por asentamientos de terreno, o por accidentes; con esto vuelve a tomar fuerza la idea de que el gran valor de estos métodos no destructivos es su inmediatez y practicabilidad de aplicación en cualquier momento que sea necesario y llevar así un registro de los cambios constantes del espécimen de hormigón armado.
13. La complementariedad de los métodos es evidente y permite una adecuada planificación de reparaciones o prevenciones que propicien una mejor vida útil de la

estructura, por ejemplo, una baja resistividad eléctrica puede demostrar una alta permeabilidad y saturación de los poros, los que conducen la electricidad gracias al líquido contenido en ellos, lo que puede ser solucionado con impermeabilizantes especiales que sellen los poros y así evitar el ingreso de cloruros, lo que no sería deducido con el sólo resultado de rebote del esclerómetro, que podría indicar una relativa dureza de la superficie, la cual podría ser porosa del mismo modo, o utilizando sólo ultrasonidos, que puede darnos datos de la densidad, pero no específicamente de la saturación de los poros, ya que un hormigón húmedo con respecto a uno seco, sólo presenta un 5% de variación en la velocidad de ultrasonido, según las referencias estudiadas. Por lo tanto no sería evidente esta variación para el experto durante la ejecución de la medición.

14. Por otra parte, el objeto de este ensayo además de buscar relaciones sincrónicas entre cada uno de ellos, tiene como motivación ser realizados in situ, tal como se realizaría en la práctica durante una inspección real. Este punto de partida tuvo a su favor, reafirmar la característica práctica de los equipos, sin embargo, tiene en contra un apreciable factor de error debido a los cambios que como hemos referido anteriormente se van provocando con el paso del tiempo y la

exposición a la intemperie, y que además se han evaluado en la tabla de sincronización de registros, donde sólo el 5,12% de la muestra coinciden perfectamente los rangos de medición entre los 3 métodos y el 56,92% coinciden 2 de los 3 rangos, lo que arroja un 37,96% del total de la muestra sin coincidencias, que si bien no son antitéticas entre sí del todo, pueden prestarse para la cuestionar la fiabilidad de los métodos no destructivos, necesitando la corroboración posterior de laboratorio. La gran cantidad de bibliografía revisada y estudiada, contiene ensayos realizados con métodos no destructivos, pero en un entorno controlado dentro de un laboratorio, con humedades atmosféricas determinadas, influencias de carbonatación recreadas y medidas, esfuerzos provocados con equipos adecuados, etc. Aunque se realizó la constatación de factores ambientales durante cada realización de mediciones, y no se evidenciaron grandes cambios, existe un margen de error que no puede ser vigilado ni cuantificado.

Esto nos motiva a continuar esta investigación en un ambiente más controlado, de manera de contrastar resultados y comparar cartografías in situ con cartografías realizadas en laboratorio, lo que permitiría codificar factores de corrección muy útiles para un efectivo uso de los métodos de ensayo no destructivos en el hormigón.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

AENOR, A. E. (2006). UNE EN 12504-4. Ensayos de Hormigón en Estructuras, Parte 4. Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación.

B.J. Blaiszik, S. K. (2010). Self-Healing Polymers and Composites. Annual Review of Materials Research. Obtenido de [www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)

Broto, C. (2005). Enciclopedia Broto de Patologías de la construcción. Barcelona, España.

Colombia, U. N. (2006). Manual para inspección visual de puentes y pontones. Bogotá.

Damazo, J. D. (2006). Pruebas no destructivas del concreto. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

D'Andrea, R. (2010). Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Estévez, J. (2013). Patología y Recuperación de Estructuras de Hormigón. A Coruña: Universidad de A Coruña.

Fernández Canovas, M. (2006). HORMIGON. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Gartner, E. (2010). U.S. Geological Survey. Obtenido de USGS Commodity Statistics and Information: Cement: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2010-cemen.pdf>

Generalitat Valenciana., I. V. (2006). Guía para la inspección y evaluación preliminar de estructuras de hormigón en edificios existentes. Valencia: Graficas Díaz s.l.

González, A. (2011). TESIS "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL HORMIGÓN Y SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORURO". Santiago de Chile: Universidad de Chile.

González, E. A. (s.f.). Ensayos de hormigón en estructuras: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. Medida de transmisión indirecta.

Guzmán, E. (1992). Índice técnico de materiales de edificación. Santiago de Chile: Plomada Eds.

Hostalet, F. (1994). Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo del hormigón. Barcelona: Intemac.

INN. (1979). Norma Chilena 1565-Of79. Santiago: Instituto Nacional de Normalización de Chile.

Jonkers, H. .. (2012). BACTERIA-BASED SELF-HEALING CONCRETE – INTRODUCTION. Delf: Universidad de Delf.

- Jonkers, H. (2010). BioConcrete:. Delf : EU-US Frontiers of Engineering Symposium.
- Li, V. (2009). Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. Michigan: Universidad de Michigan.
- Malhotra. V.M, C. N. (2004). HANDBOOK ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE. Philadelphia: CRC Press LLC.
- Mejía Orellana. Vicky, P. E. (2011). Determinación de la Resistencia y Resistividad Eléctrica de Probetas de varios Diseños de Hormigón sometidas a Ataques de Contaminantes. Guayaquil, Ecuador: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- Ministerio de Fomento, E. (2008). Norma EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.
- Monteagudo, S. (2010). Análisis estructural de muros de fábrica, mediante ensayos no destructivos. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Normalización, C. E. (2001). Norma UNE 80303-1.
- Normalización, C. E. (2005). NORMA UNE 1504. En Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 1: Definiciones. (pág. 7). Bruselas: CEN.
- Ortega, N. R. (2007). Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas. Argentina: Universidad Nacional del Sur.
- Pérez, L. (2010). Trabajo Fin de Máster, "Vida útil residual de las estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión". Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Proceq. (2011). Martillo para ensayos de hormigón. Zurich: Proceq.
- Proceq. (2013). Manual de operación Pundit Lab / Pundit Lab+ Instrumento Ultrasonico. Zurich: Proceq.
- Proceq. (s.f.). Folleto informativo Resipod Family. Zurich: Proceq.
- Proceq. (s.f.). Manual de operación Ensayos de durabilidad de hormigón. Zurich: Proceq.
- RAE. (2001). Diccionario de la lengua española (DRAE).
- Rejón de Silva, D. (1788). Diccionario de las Nobles Artes para Instrucción de Aficionados y uso de Profesores.
- Testa, M. (2008). Apuntes Curso Construcción. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Tobio, J. M. (1967). Ensayos no destructivos-Métodos aplicables a la construcción. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.
- BOMA. (2003). Legajo técnico y planimetría, pliego de condiciones estructurales. Barcelona: BOMA.