

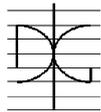
Trabajo de Investigación CST/ MIH-

EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE PREFABRICADOS DE HORMIGÓN SOMETIDOS A AMBIENTES MARINOS MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO.

Por:

Tarek Ibrahim Mahmoud Selouma

Noviembre 2009

Autor / Author: Tarek Ibrahim Mahmoud Selouma		Fecha / Date: Noviembre 2009	
Título / Title EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE PREFABRICADOS DE HORMIGÓN SOMETIDOS A AMBIENTES MARINOS MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO.			
Directores del trabajo / Supervisores: Dr. José Vicente Fuente Ramírez Dr. José María Monzó Balbuena.		Código / Code: CST/MIH-	Nº páginas / Pages:
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA			UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
Palabras clave / Keywords: Durabilidad, ambiente marino, ensayos no destructivos, Ultrasonido, SEM, tomografía ultrasónica.			
Código Unesco: 2201.09 Ultrasonidos 2202.07 Interacción de ondas e-m con la materia 3305.05 Tecnología del Hormigón			

Resumen

La mayoría de las estructuras del hormigón en ambientes marinos muestran signos de degradación debido a la corrosión de las armaduras en presencia de los cloruros. En algunos casos, la degradación es visible dentro de unos años de la finalización de la construcción. A pesar de que los ambientes marinos son particularmente severos, otros factores afectan a la degradación prematura debido a corrosión, como: la calidad pobre de la construcción a consecuencia de la mano de obra; estándares inadecuados se basaron en medidas prescriptivas y diseño pobre a consecuencia de información insuficiente con consideraciones a los parámetros que influyen el proceso de degradación.

Los ensayos no destructivos tienen una gran importancia económica y social, ya que puede servir para determinar la durabilidad de las estructuras de ingeniería civil donde estos materiales tienen una amplia utilización. Sin embargo, la utilización de las técnicas no destructivas en estos materiales no tiene un uso extendido, motivado principalmente por las características microestructurales heterogéneas que poseen estos materiales.

El objetivo de este trabajo es obtención de un procedimiento de evaluación del ciclo de vida de los hormigones preparados y puestos en servicio en ambientes marinos. Para ello, se precisa la integración de diferentes técnicas de caracterización de las propiedades que afectan a los hormigones.

A partir del estudio bibliográfico realizado se han detectado diversas lagunas en el tratamiento de la degradación el hormigón en ambiente marino, para cuya resolución se ha planeado un estudio experimental, consistente en el análisis de dos marcos de hormigón prefabricado, uno fabricado a partir de un cemento normal o convencional CEM II-AL 42.5 R y otro CEM I-42.5 R/SR. Esto se ha planificado así para obtener dos velocidades de degradación en cada cemento. Sobre los testigos extraídos de estos marcos se han realizado una serie de ensayos de caracterización (resistencia a compresión, porosidad abierta, velocidad de transmisión de ultrasonidos (ondas longitudinales y trasversales, inspección ultrasónica a partir de tomografías de velocidad (transmisión) y de análisis del

ruido granular (pulso-eco), microscopía eléctrica de barrido (SEM). Todo ello con el objetivo de conocer cómo evolucionan los mismos a lo largo del proceso de degradación y su correlación entre unos y otros.

Abstract

A majority of concrete structures in marine environments show signs of degradation due to the corrosion of the reinforcement in the presence of chlorides. In some cases, the degradation is visible within a few years of construction completion. Despite the fact that the marine environments is particularly severe, other factors affect the premature degradation due to corrosion, such as: poor construction quality as a result of poor workmanship; inadequate standards based on prescriptive measures; and poor design as a result of insufficient information with regards to the parameters that influence the degradation process.

Nondestructive tests has evidenced one of the greatest economic and social importances, since it can used to determine the durability of civil engineering structures where these materials are widely used. However, the usage of nondestructive techniques in these materials is not widespread around of the world, motivated mainly by the heterogeneous microstructural characteristics that show by these materials.

The objective of this work is to obtain an evaluation procedure of the life cycle of concrete prepared and put into service in marine environments. For this purpose, accurate integration of different techniques is used for properties characterization that they affect to the concrete.

From the literature study that realized several gaps in the assessment of concrete deterioration in marine environment, for whose resolution has planned an experimental study, consisting of the analysis of two precast concrete elements, one made from the normal or conventional cement CEM II A-L 42.5R and the other CEM I-42.5 R/SR. This has been planned to get two degradation velocities in each one of cements. Due to the extracted cores of these elements that have been a number of characterization tests, compressive strength, open porosity, velocity of transmission of ultrasonic waves (longitudinal and transverse waves), ultrasonic tomography image inspection and analysis of grain noise (pulse echo), scanning electron microscopy (SEM). All of the above, with the objective to know how is the

evolution of these parameters along the degradation process and their relationships between them.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	4
1.1.1.	<i>Durabilidad de las estructuras de hormigón</i>	4
1.1.2.	<i>Durabilidad del hormigón en ambiente marino</i>	5
1.1.3.	<i>Zonas de exposición</i>	6
	Zona de carrera de mareas	6
	Zona atmosférica	7
	Zona sumergida	7
1.1.4.	<i>Deterioro del Hormigón</i>	9
1.1.4.1.	Ataque por sulfatos	9
1.1.4.2.	Ataque por la acción de ciclos hielo-deshielo	11
1.1.4.3.	El deterioro químico por ácidos	12
1.1.4.4.	El deterioro químico por las sales	13
1.1.4.5.	La reacción álcali-árido	14
1.1.5.	<i>Hidratación del cemento Portland</i>	17
	El Silicato tricálcico	17
	El Silicato dicálcico	17
	El Aluminato tricálcico	18
	El Ferrito aluminato tetracálcico	19
	Para el caso de óxidos de calcio y magnesio libres,	19
1.1.6.	<i>Ensayos no destructivos</i>	20
	Introducción	20
1.1.6.1.	Ensayos No Destructivos por Ultrasonidos	22
1.1.6.1.1.	La técnica de transmisión- recepción (Tx-Rx)	23
1.1.6.1.2.	La técnica de pulso/eco (P/E)	25
1.1.6.2.	Los efectos de las Propiedades del hormigón a la velocidad del pulso ultrasónico	26
1.1.6.2.1.	Tamaño, clasificación, tipo y contenido del árido	26
1.1.6.2.2.	El tipo de cemento	27
1.1.6.2.3.	La relación agua/cemento	27
1.1.6.2.4.	Aditivos	27
1.1.6.2.5.	La edad del hormigón	28
1.1.6.3.	Ensayos no destructivos por ultrasonido en la ingeniería civil	28
2.	OBJETIVOS	34
3.	MATERIALES Y DESARROLLO EXPERIMENTAL	36
3.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	36
3.1.1.	<i>Cemento</i>	36
3.1.2.	<i>Árido</i>	36
3.1.3.	<i>Agua</i>	37
3.1.4.	<i>Aditivos</i>	38
3.2.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	38
3.2.1.	<i>Dosificación del el hormigón y fabricar los marcos</i>	38
3.2.2.	<i>Obtención de los testigos a analizar</i>	39
3.2.3.	<i>Preparación el agua de mar en laboratorio</i>	41
3.2.4.	<i>Ensayo de la resistencia a compresión</i>	42
3.2.5.	<i>El ensayo de porosidad abierta</i>	43
3.2.6.	<i>El ensayo de ultrasonido transmisión-recepción (Tx-rx) y ruido granular (pulso/eco)</i>	45
3.2.7.	<i>Tomografía ultrasónica</i>	48
3.2.7.1.	Imágenes radiales o diametrales	49
3.2.7.2.	Imágenes axiales	50
3.2.8.	<i>La Microscopía Electrónica de Barrido</i>	51
3.2.9.	<i>Porosimetría de Hg</i>	53
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1.	POROSIDAD Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN	54
4.2.	POROSIDAD Y ULTRASONIDO RUIDO GRANULAR	57
4.3.	POROSIDAD Y ULTRASONIDO TRASMISIÓN-RECEPCIÓN (ONDA-P Y ONDA-S)	60
4.4.	RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RUIDO GRANULAR ULTRASONIDO	63

4.5.	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN ONDA LONGITUDINAL (ONDA-P) Y ULTRASONIDO RUIDO GRANULAR	65
4.6.	TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA.....	66
4.7.	LA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	68
5.	CONCLUSIONES	74
6.	TRABAJO FUTURO.....	75
7.	BIBLIOGRAFÍA	76

1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizado en todo el mundo. Esto se debe a sus buenas propiedades estructurales, facilidad de fabricación y bajo coste. Sin embargo, hay algunas deficiencias importantes en las propiedades del hormigón, como la baja resistencia a tracción y la porosidad. La aparición de poros internos en el hormigón se debe a la naturaleza del mismo. Se trata de un material que es producto directo de los procesos de hidratación que implican la reacción entre el agua y el cemento. En todos los casos, los restos de agua en el hormigón, una vez endurecido, se convertirán en poros de diversos tamaños, que en gran parte serán poros capilares. Estos poros están conectados entre sí, ya sea directamente u a través de los poros de gel. Un volumen alto de poros determina una mayor capacidad de transporte de fluidos como el agua o gases, así como también por otras sustancias químicas normalmente transportadas por los anteriores, y que son potencialmente perjudiciales para el hormigón. De esta forma puede iniciarse un proceso más o menos lento de deterioro de las estructuras compuestas por este material.

La distribución del tamaño de los poros está relacionada fundamentalmente con el tipo y velocidad de los mecanismos de transporte y de fijación, en relación con el agua. El rango del tamaño de poro en la pasta de cemento comprende varios órdenes de magnitud, pudiendo clasificarse en poros de compactación, poros de aire ocluido, poros capilares y poros de gel (Méndez 2007).

El hormigón expuesto al agua de mar puede deteriorarse debido a varios factores: la agresividad química de los constituyentes de la misma sobre los productos de hidratación del cemento, en especial sulfato y magnesio, a expansiones debidas a la reacción álcali-árido, si hay árido reactivo, a la presión de cristalización de sales en el hormigón, a la acción del hielo en climas fríos, a la corrosión de las armaduras y a la erosión física debida al oleaje. Estas acciones producen un aumento de la permeabilidad del hormigón, retroalimentando el proceso (Bermúdez 2007).

La permeabilidad es la propiedad que mide la facilidad que tiene un material de ser atravesado por un fluido debido a la existencia de un gradiente de presión entre dos caras del mismo. En el caso del hormigón, y en el caso particular del ambiente

marino, donde hay una gran concentración de agresivos químicos en medio acuoso, la permeabilidad representa un riesgo potencial de deterioro importante. Por lo tanto, con el fin de reducir la probabilidad de ser atacado por sustancias agresivas, se debe reducir la permeabilidad del hormigón, relacionada intrínsecamente con la porosidad del mismo. Esta deseada reducción se puede conseguir de varias formas, ya sea bajando el volumen total de los poros, o bien disminuyendo el volumen de aquellos poros de mayor tamaño (poros permeables). Los materiales suplementarios como el humo de sílice o cenizas volantes son muy bien conocidos por su capacidad de reducir de forma efectiva el volumen total de los poros.

En este sentido la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE 2000) exige, para el ambiente marino, utilizar hormigones de relación agua/cemento inferior a 0,5, contenido de cemento superior a 325 Kg/m³, el empleo de un cemento de características resistentes a este tipo de ambiente (MR o SR) y un recubrimiento superior a 45 mm. Los requisitos de otras normativas son similares o incluso más restrictivos.

En este trabajo de investigación multidisciplinar se estudia y analiza la incorporación de diversas metodologías que permiten dar una respuesta conjunta al problema de la caracterización del hormigón, que se aborda desde muchos puntos de vista y no hay una solución global al mismo. En particular, el trabajo plantea el estudio y seguimiento de los procesos de degradación del hormigón, los cambios microestructurales que se producen, mediante técnicas no destructivas y los análisis físico-químicos de los que ya se dispone en el estado del arte.

Los ensayos no destructivos, aquí planteados, suponen la realización de una serie de medidas in-situ en el hormigón y que se relacionan con parámetros indirectos del material. Estos parámetros no son suficientes como para poder conocer el estado de degradación del hormigón por ellos mismos. No obstante, se puede investigar la influencia que determinados cambios microestructurales tienen en ciertos parámetros no destructivos. A su vez, estos cambios microestructurales se pueden determinar cuantitativamente con análisis físico-químico y por último poder evaluar la durabilidad del hormigón a lo largo de su ciclo de vida.

Por tanto, el trabajo se basa en diferentes hipótesis de trabajo que parcialmente han sido demostradas en investigaciones anteriores, desarrollando aquéllas que requieren para poder extraer más información que la que se observa en el estado del arte.

La primera hipótesis es la que se basa en que los cambios microestructurales se pueden medir con inspecciones ultrasónica de pulso-eco y transmisión de media y alta frecuencia. Es conocido que las ondas elásticas interaccionan con la estructura porosa del mismo, por lo que se investigan técnicas de ruido estructural ultrasónico como herramienta de análisis para poder observar estos cambios. Esta técnica, al configurarse como pulso-eco, permite medir en muchos y diversos puntos, permitiendo encontrar zonas anómalas que podamos asimilar a zonas degradadas.

La espectroscopía dieléctrica se basa en la interacción de una onda electromagnética con la estructura porosa, dependiendo de la permitividad del medio y de la presencia de poro conectado en la muestra. Asimismo, la resistividad eléctrica se relaciona con la matriz cementante y su capacidad resistente.

Las técnicas de análisis físico-químico permiten evaluar características microestructurales del hormigón como la capacidad resistente, la composición química de los compuestos que aparecen a lo largo del curado, los cambios en la estructura porosa del material. Estos ensayos permitirán caracterizar la muestra en particular y relacionarlas con la degradación según edades de exposición y tipos de agente agresivo.

Por último, el estudio ha llevado implícito la correlación multiparamétrica de los resultados.

La finalidad de este estudio, donde se enmarca el presente trabajo de tesis de máster, es obtener un procedimiento de evaluación del ciclo de vida de los hormigones preparados y puestos en servicio en ambientes marinos basados en técnicas END y AF-Q.

1.1. Estado del conocimiento

1.1.1. Durabilidad de las estructuras de hormigón

La durabilidad de un hormigón de cemento Portland puede definirse como la capacidad que tiene éste de resistir a la acción del ambiente, ataques químicos, físicos, biológicos, o cualquier proceso que tienda a deteriorarlo. Así, un hormigón durable será el que conserve su forma original y su capacidad resistente durante su vida de servicio en el tiempo, cuando se encuentra expuesto a estas acciones (Canovas, 2004) (EHE, 2000).

En una primera aproximación se puede decir que la durabilidad de una estructura de hormigón depende fundamentalmente de dos factores:

- Las condiciones ambientales y de uso a que esté sometida.
- La mayor o menor dificultad que el hormigón presenta al paso de sustancias desde el medio ambiente a su interior.

Las normas tienen en cuenta estos factores y, en función del tipo de exposición de la estructura, exigen determinadas características al hormigón para hacerlo más o menos impermeable.

El transporte combinado de calor, humedad y sustancias químicas a través de la masa del hormigón y el intercambio con el medio exterior, así como los parámetros que controlan estos mecanismos del transporte, constituyen los elementos principales de la durabilidad. Si se exceptúa el deterioro mecánico, la presencia de agua es el principal factor de deterioro. La estructura de la red de poros (tipo, tamaño y distribución) y las fisuras gobiernan el transporte de agua a través del hormigón, de modo que el control de la naturaleza y distribución de los poros, así como de las fisuras, es una labor esencial en el proyecto y ejecución de una estructura. El tipo y la velocidad de los procesos de degradación del hormigón (físicos, químicos y biológicos) y del acero de armar y de pretensar (corrosión) determinan la resistencia y rigidez de la estructura. Esto, junto con el aspecto superficial, determina el comportamiento de la estructura (Vu, et al. 2001).

La penetración de elementos agresivos desde el exterior (sustancias y gases disueltos) está controlada por la permeabilidad del hormigón que depende, a su

vez, de la estructura de los poros, la configuración de las fisuras y el contenido de agua en los mismos (Shazali, et al, 2006).

1.1.2. Durabilidad del hormigón en ambiente marino

La mayoría de las aguas de mar presentan una composición química uniforme, caracterizada por la presencia de un 3,5% en peso de sales solubles. Las mayores concentraciones iónicas son las del Na^+ y del Cl^- , que son de 11.000 y 20.000 mg/litro, respectivamente. También hay cantidades significativas de Mg^{2+} y SO_4^{2-} , normalmente 1.400 y 2.700 mg/litro, respectivamente. El pH varía entre 7,5 y 8,4 (Mehta, 2003) (Canovas, 2004). Por varias razones, el efecto del agua de mar en el hormigón merece especial atención. Primeramente, las estructuras costeras y marinas están expuestas a la acción simultánea de varios procesos de deterioro físico y químico, que representan una oportunidad excelente para entender la complejidad de los problemas de la durabilidad.

En segundo lugar, los océanos representan hasta un 80% de la superficie de la tierra. Por lo tanto, un gran número de estructuras están expuestas al agua de mar, ya sea directa o indirectamente (los vientos pueden acarrear brisas del agua de mar hasta un cierto número de kilómetros en el interior de las costa. Los muelles de hormigón, las plataformas, los rompeolas y los muros de contención se emplean ampliamente en la construcción de puertos y embarcaderos.

El hormigón expuesto a ambiente marino puede deteriorarse como consecuencia de los siguientes factores (Mehta, 2003):

- Los efectos combinados de la acción química de los constituyentes del agua de mar sobre los productos de hidratación del cemento.
- La expansión álcali-árido (cuando se encuentran presentes áridos reactivos).
- La presión de cristalización de sales dentro del hormigón, si una cara de la estructura está sometida a condiciones de humedecimiento y las otras a condiciones de secado.
- La acción de la helada en climas fríos.
- La corrosión del acero embebido en elementos armados.
- La erosión física debida a la acción de las olas y de los objetos flotantes.

El ataque al hormigón debido a cualquiera de estas causas tiende a incrementar la permeabilidad. Esto no solamente hará al material progresivamente más susceptible de mayor acción por el mismo agente destructivo, sino también ante otros tipos de ataque. De esta forma, un conjunto de causas de deterioro entrelazadas, tanto químicas como físicas, se encuentran trabajando cuando una estructura de hormigón expuesta al agua de mar está en una fase avanzada de degradación.

Aunque la acción de los cloruros en el hormigón en masa presenta escasa incidencia en relación con la capacidad resistente (aunque es sabido que reduce algo la resistencia), en el hormigón armado, más aún, en el hormigón pretensado, su efecto es muy perjudicial, porque favorece el desarrollo de fenómenos corrosivos, incluso en hormigones con pH altos.

Las investigaciones sobre estructuras de hormigón armado han demostrado que generalmente, el hormigón completamente sumergido en el agua de mar sufre solamente algún deterioro o ninguno, y que el hormigón expuesto a sales en el aire o situado en la zona en la que llega accidentalmente el agua, sufre deterioro, especialmente cuando es permeable. Las investigaciones muestran que el hormigón sometido a la acción de la carga de mareas es el que tiene un mayor deterioro.

1.1.3. Zonas de exposición

En la Figura 1. 1. (Mehta, 2003) se esquematiza el ataque producido por el agua de mar sobre un pilar de hormigón armado, en el que se pueden diferenciar tres zonas.

Zona de carrera de mareas: es aquella en la que existe el ataque combinado de corrosión del acero debido al aumento de concentración de cloruros a través de los ciclos de humedad y sequedad. Por otra parte, la cristalización de sales sumada a los gradientes térmicos tiende a fisurar al hormigón. También se produce una erosión debido a la acción directa de las olas y de los sólidos que flotan en ellas.

Zona atmosférica: es aquélla en la que la estructura recibe, aún a pesar de no estar en contacto con el agua, un aporte elevado de sales originado por el nivel de saturación de vapor de agua que presenta el aire en zonas costeras, capaz de producir depósitos salinos en zonas de la estructura, donde se producen ciclos de humedad y secado. Resulta poco dañada en forma directa, pero la difusión de cloruros provoca la corrosión de las armaduras. El nivel de sales va disminuyendo en función de la distancia del mar y de la altura, si bien según la velocidad y la dirección de los vientos dominantes este efecto puede llegar a reproducirse varios kilómetros tierra adentro. Los daños que pueden manifestarse en esa zona son los ocasionados por la corrosión de armaduras por la acción de los iones cloruro.

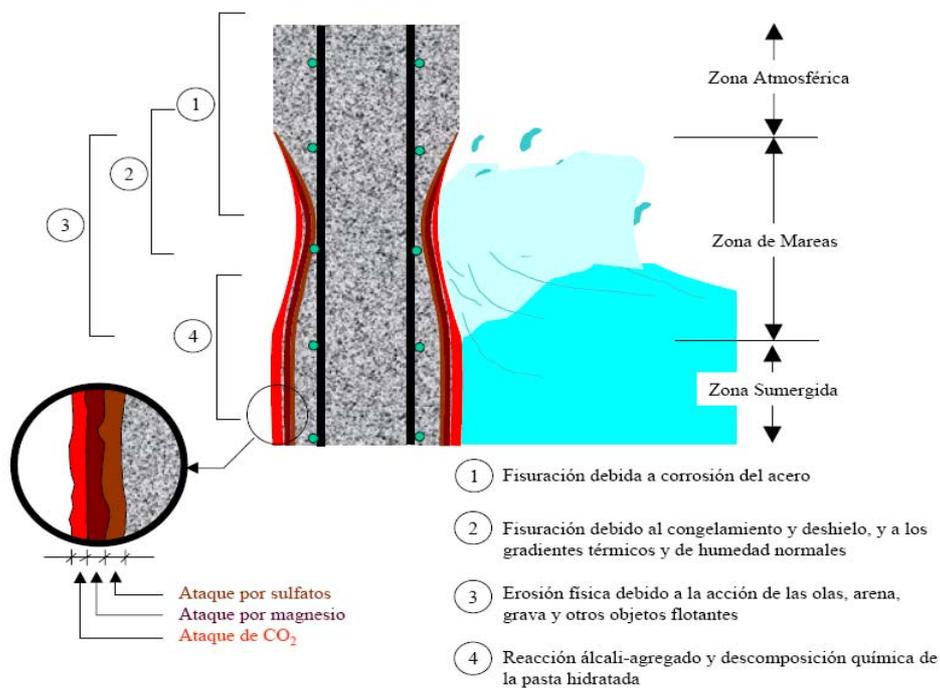
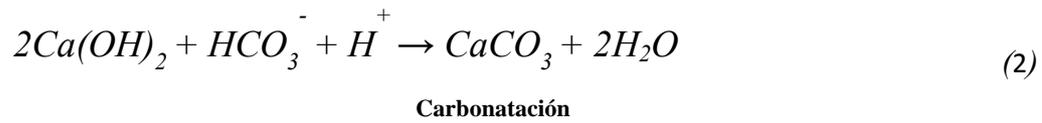
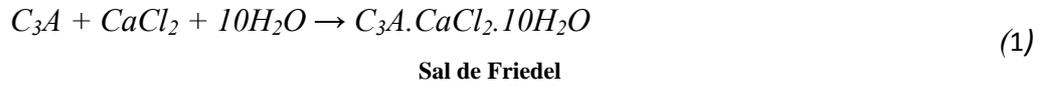


Figura 1. 1. Esquema del ataque producido por el agua de mar sobre un pilar de hormigón armado, diferenciándose tres zonas (Mehta, 2003).

Zona sumergida: es la que está por debajo del nivel de la mareas y, por tanto, en régimen de inmersión permanente. Los daños más significativos son producidos por el ataque químico de las sales agresivas y por los microorganismos que favorecen el desarrollo de las incrustaciones biológicas y que, en casos extremos, pueden dar lugar a procesos de corrosión biológica sobre las armaduras. A pesar de que se ha mencionado la presencia de una alta concentración de iones agresivos como Mg^{2+} y SO_4^{2-} la acción conjunta de estos otros iones resulta menos agresiva

que si los mismos atacaran individualmente. Esto se debe fundamentalmente a la formación de cloroaluminato de calcio también conocido como *sal de Friedel*-Ecuación 1 y la carbonatación superficial debido a la acción del CO₂ disuelto en el agua, Ecuación 2.



1.1.4. Deterioro del Hormigón.

El conocimiento de los procesos de deterioro del hormigón es necesario para poder antes predecir el desarrollo del deterioro. Este apartado proporciona una selección de los mecanismos de deterioro en estructuras de hormigón. Y se describirán las causas y las consecuencias de cada mecanismo. Existen muchos procesos que producen daño al hormigón. Estos mecanismos de deterioro pueden ocurrir de modos diferentes.

1.1.4.1. Ataque por sulfatos

La presencia de sulfatos en la matriz de cemento puede causar una reacción expansiva que produce grietas en el hormigón afectado. Los sulfatos habitualmente provienen del árido que contiene sulfato o de la exposición al agua subterránea contaminada, al agua de mar, la descomposición de sustancias orgánicas o bien a aguas residuales industriales. Otra fuente de sulfatos es el hormigón reciclado que se usa como árido en un hormigón nuevo.

Un mecanismo de deterioro se produce de la formación de yeso como resultado del intercambio químico entre los iones de sulfato provenientes del medio ambiente y que reemplazan al OH⁻ del hidróxido de calcio formado durante la hidratación de la pasta cementicia como subproducto de la formación de silicatos de calcio (CSH). Este mecanismo también es conocido como ataque ácido de los sulfatos. La reacción química está representada por la ecuación 3.



Estas formaciones de sulfato actúan modificando la reacción principal de formación de etringita. La etringita se cristaliza asociada con 32 moléculas de agua (ecuación 4) que causan un incremento del volumen de la pasta, que al encontrarse en estado endurecido produce una fisuración progresiva con incremento de la porosidad y la consiguiente disminución de resistencia (Gaal, 2004). Si la presión generada es suficiente dentro de la matriz del cemento, el hormigón se fisurará.

expansión que acompaña la formación de etringita y la absorción del agua. Este proceso se llama etringita secundaria (Gaal, 2004).

1.1.4.2. Ataque por la acción de ciclos hielo-deshielo

El deterioro del hormigón por la acción del hielo-deshielo es debido a la expansión del agua en los poros debido a congelación. En las estructuras del hormigón empieza el hielo del exterior hacia el interior. Si los poros en la parte externo de la capa exterior del hormigón están bloqueados por la congelación del agua en los mismos, entonces se evitará la expansión del agua de poro debajo del hielo. Si la presión aumenta, dañará la capa exterior del hormigón que a menudo causa descascarillamiento. Un ejemplo del daño causado por los ciclos del hielo-deshielo se presenta en la Figura 4.

Los principales mecanismos que explican el deterioro por hielo-deshielo corresponden a la presión osmótica y la presión hidráulica en la red porosa de los materiales (Méndez, 2007). Se listan a continuación:

- la energía adicional de la superficie del poro provoca una reducción de la energía potencial del agua en el interior de los poros, y por tanto, una disminución del punto de congelación,
- en los hormigones existe una gran variedad de tamaños de radio de poro en la pasta de cemento, solo aproximadamente un tercio de éstos se congela a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y alrededor de dos tercios a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, permaneciendo una película de agua líquida en la superficie del poro incluso después de helarse el resto,
- si las condiciones ambientales y el grado de saturación del hormigón lo permiten puede producirse una importante evaporación de agua, en el paso del estado líquido al estado sólido del agua. Este fenómeno no puede producirse si el hormigón no está completamente saturado. De hecho, no todos los poros están saturados de agua, por los que en los poros de gel es prácticamente imposible que cristalice el agua, mientras que los poros de aire no llegan a saturarse. También, como consecuencia de la energía superficial, se produce una disminución de la presión hidráulica que se desarrolla en los poros de menor tamaño,

produciéndose una difusión del agua líquida desde los poros más pequeños a los de mayor diámetro.

El deterioro del hormigón por la acción del hielo-deshielo puede ocurrir cuando el hormigón está críticamente saturado, cuando aproximadamente el 91% de sus poros están llenos de agua. Cuando el agua se congela ocupa un 9% más del volumen que ocupe el agua. Si no hay ningún espacio para esta expansión de volumen en los poros, la congelación del agua puede causar daños en el hormigón (Experts, 2006).



Figura 4. Deterioro debido a los ciclos hielo-deshielo (Experts, 2006).

1.1.4.3. El deterioro químico por ácidos

La acción de los ácidos se inicia con la disolución de la capa de carbonatos presente en la superficie del hormigón (dada generalmente por recarbonatación – reacción de la portlandita con el CO_2 del ambiente), para continuar su ingreso por los poros y lixiviar compuestos internos, especialmente, el hidróxido de calcio mediante la reacción ácido-base (ACI_201, 2001).

El cemento hidratado muestra una resistencia pobre a los ácidos. Los ácidos sulfúrico, clorhídrico y nítrico, son fuertes y altamente agresivos. La agresividad se aumenta al aumentar la concentración y la temperatura del ácido. Las soluciones en movimiento son más agresivas que las soluciones estáticas, debido a que constantemente se renueva el ácido en contacto con el hormigón. Los ácidos que forman productos solubles de reacción, generalmente son más agresivos que los

ácidos que forman productos insolubles de reacción. El proceso químico del efecto de los ácidos sobre los compuestos hidratados del cemento esta presentado en la ecuación 5.



La sílice es un material recién formado, que sustituye los silicatos cálcicos hidratados, muestra menos resistencia que el material original. Como consecuencia la estructura del hormigón se deteriorará fácilmente debido a la abrasión o cualquier otra carga mecánica (Gaal, 2004).

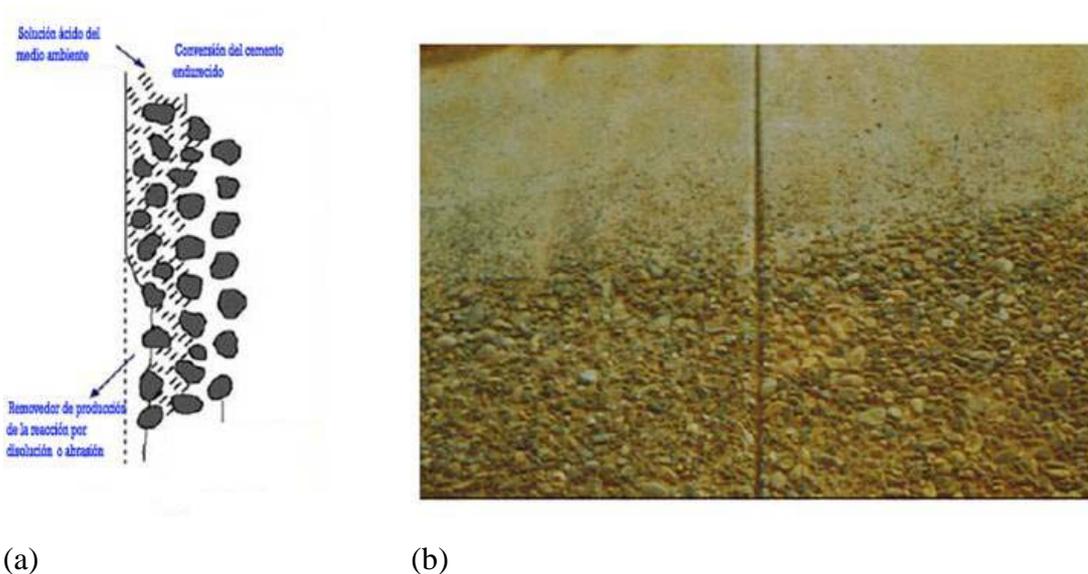


Figura 5: Pérdida de la superficie del hormigón debido al ataque ácido: a) Mecanismo, b) ejemplo del ataque ácido sobre una pared de hormigón (Naus, 2007).

1.1.4.4. El deterioro químico por las sales

El ingreso de sales en el cemento, y las reacciones con los compuestos hidratados del cemento causan el deterioro de la matriz y/o la pérdida de la protección frente a la corrosión del acero. Tanto la oposición física de los materiales al ingreso de sales como la resistencia química de los materiales a reacciones con sales determinan el comportamiento del material. El tipo de cemento y las proporciones de la mezcla son claves en la resistencia del hormigón frente al ataque químico.

Al actuar una sal sobre un hormigón puede dar lugar a la formación de productos que pueden ser solubles o insolubles y expansivos. El grado de corrosión depende del tipo de aniones o de cationes que tenga la sal, del tipo de cemento, de la permeabilidad del hormigón, de la concentración de sal y de la temperatura.

El deterioro del hormigón por las sales es similar al deterioro por los ácidos; la matriz de cemento queda afectada por las sales a las cuáles esté expuesta. Un ejemplo de las más agresivas al hormigón son las de magnesio y amonio. El magnesio actúa con facilidad en las reacciones de intercambio favoreciendo la corrosión del hormigón. Si está en cantidad suficiente puede reemplazar al calcio produciendo daños importantes en el hormigón. En algunos casos la formación del hidróxido de magnesio cristalino (brucita), puede ser beneficiosa debido a que, al ser este hidróxido insoluble, sella los poros impidiendo o retardando otras acciones corrosivas (Canovas, 2004). Pero baja el pH de la fase acuosa reduciendo la protección de la armadura.

Todas las sales de amonio son muy solubles. Las reacciones de intercambio con cal dan lugar a la formación de amoníaco en forma gaseosa. Si se forman sales de amonio con cloruros, sulfatos, sulfuros, etc., éstas resultan perjudiciales, especialmente los nitratos de amonio. El proceso químico del efecto perjudicial del cloruro de amonio sobre los compuestos hidratados del cemento se presenta en la ecuación 6 (Gaal, 2004).



1.1.4.5. La reacción álcali-árido

Algunos áridos que contienen sílice amorfa como los ópalos o, parcialmente cristalizada como las calcedonias y las tridimitas, reaccionan con los alcalinos del cemento, cuando existe presencia de agua en los poros, dando lugar a compuestos gelatinosos de silicato alcalino que son expansivos y pueden destruir el hormigón. La reacción álcali-sílice (ASR) es la más común y estudiada de las reacciones álcali-árido. En la fabricación del hormigón, la hidratación del cemento Portland da como

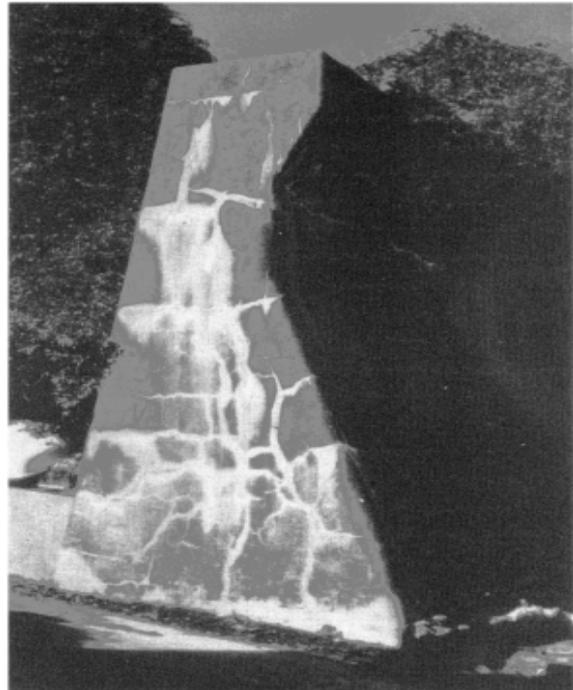
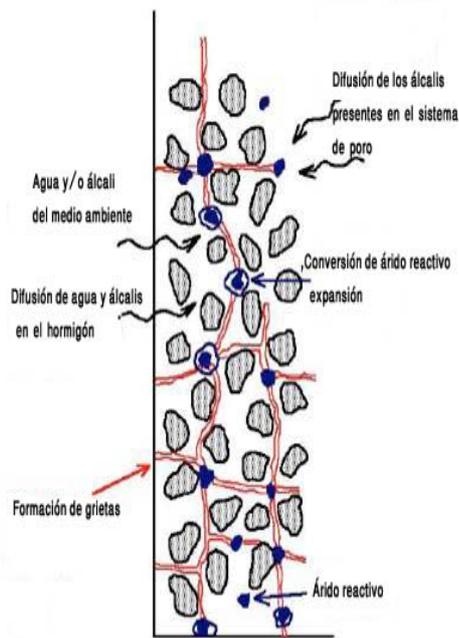
resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que al embeber agua, aumenta el volumen, la presión en la matriz de cemento y finalmente desarrollarán las grietas.

El ataque por la solución alcalina, lo que provoca una desintegración de la estructura y el paso de la sílice en solución al estado de iones positivos (H_2SiO_4). El proceso químico de la reacción de sílice-álcali está presentado en la ecuación 7 (Segarra, 2005).



No todas las estructuras de hormigón son propensas a la reacción de álcali-árido. Esta reacción sólo ocurrirá en ciertas condiciones. Estas condiciones son (Gaal, 2004):

- la sílice mal cristalizada o amorfa (SiO_2) fácilmente formará parte de la reacción álcali-árido,
- tiene que haber agua suficiente para causar la expansión,
- tienen que estar disponibles iones suficientes de álcali para causar la formación de gel (tipo de cemento), y
- la velocidad de transporte de los iones de sodio y de potasio tiene que tener un valor relativamente alto para asegurar que una cantidad suficiente de productos de reacción está disponible para la reacción.



(a)

(b)

Figura 6: a) mecanismo, b) fisuración y exudación rompeolas, de hormigón armado, una combinación de reacción de sílice del álcali y ciclos de humedad-sequedad (Mehta 2003).

La reacción álcali-árido puede prevenirse, en general, por el uso de cemento de escoria de alto horno en vez de cemento Portland. A causa del coeficiente de difusión bajo (alta resistencia al transporte), la reacción expansiva estará con mucha probabilidad pospuesta hasta después del final del diseño de la vida útil.

1.1.5. Hidratación del cemento Portland

Cuando se mezcla el cemento Portland con agua, los silicatos y aluminatos se hidratan dando lugar a una masa rígida y dura conocida con el nombre de cemento endurecido (Cánovas, 1993).

A este proceso se le conoce como fraguado. Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de sus componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. La hidratación continúa produciéndose después del fraguado. De ahí la importancia de mantener un ambiente de elevada humedad después del fraguado. A este tratamiento se le llama curado. Durante el curado va aumentando progresivamente la resistencia mecánica del hormigón al ir precipitando sus componentes hidratados.

La hidratación separada de cada componente del cemento ocurre de la siguiente forma:

El Silicato tricálcico reacciona rápidamente con el agua produciéndose silicatos cálcicos hidratados $C_3S_2H_3$ y portlandita CH:



Estos silicatos cálcicos hidratados tienen carácter coloidal y se les conoce también como gel CSH. Tiene la capacidad de adsorber cloruro, reduciendo el riesgo de corrosión de las armaduras del hormigón.

El Silicato dicálcico reacciona más lentamente según:



El Aluminato tricálcico forma aluminatos cálcicos cristalinos, algunos son estables (los que cristalizan en el sistema cúbico) y otros meta estables (hexagonales):



Una relación agua/cemento elevada favorece la formación de aluminatos hexagonales y un valor bajo la formación de los cúbicos. Los aluminatos hexagonales pueden experimentar a largo plazo una conversión en la que se transforman en cúbicos y liberan agua:



Los aluminatos cúbicos son menos voluminosos que los hexagonales debido a la pérdida de agua. Esto hace que esta conversión venga acompañada de una disminución del volumen ocupado por los sólidos en el hormigón y por tanto una pérdida de compacidad, aumento de la porosidad y disminución de las resistencias mecánicas. En el hormigón de cemento aluminoso se puede producir también una conversión similar que es la causa principal del proceso de deterioro conocido como aluminosis.

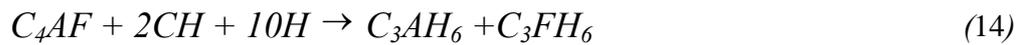
La reacción del C_3A con el agua es muy rápida, dando lugar a un endurecimiento rápido de la pasta conocido como fraguado relámpago (Cánovas, 1993).

Para evitarlo y hacer la mezcla trabajable se añade al *clinker* un regulador de fraguado que es, normalmente, yeso dihidrato (CSH_2). El yeso y el aluminato reaccionan para formar sulfoaluminato cálcico hidratado insoluble, también conocido como etringita o sal de Candlot, que bloquea superficialmente las partículas de C_3A impidiendo su hidratación a una velocidad excesiva, tal y como se expresa en la ecuación siguiente:



El C3A contribuye poco a la resistencia mecánica del hormigón y es, además, indeseable por ser atacado por los sulfatos de forma expansiva. Sin embargo, es necesario ya que los óxidos de aluminio actúan como fundente en la cocción del crudo.

El Ferrito aluminato tetracálcico se produce aluminatos cálcicos y ferritos cálcicos:



Para el caso de óxidos de calcio y magnesio libres, la formación de sus productos hidratados da lugar a un aumento de volumen:



1.1.6. Ensayos no destructivos

Introducción

Los Ensayos No Destructivos (END) son exámenes o pruebas que son utilizadas para detectar discontinuidades internas y/o superficiales o para determinar propiedades selectas en materiales, soldaduras, partes y componentes; usando técnicas que no alteran el estado físico o constitución química, dañen o destruyan los mismos, permitiendo su uso o servicio a posteriori. Dentro de los Ensayos No Destructivos están incluidos el Examen por Radiografía, Examen por Partículas Magnéticas, Examen por Líquidos Penetrantes, Examen por Corrientes Parásitas, Exámenes Visuales y Examen por Ultrasonidos. Se muestra en las Figura 1. 2 , Figura 1. 3 y Figura 1. 4, un resumen a los ensayos no destructivos, Smith (1998).

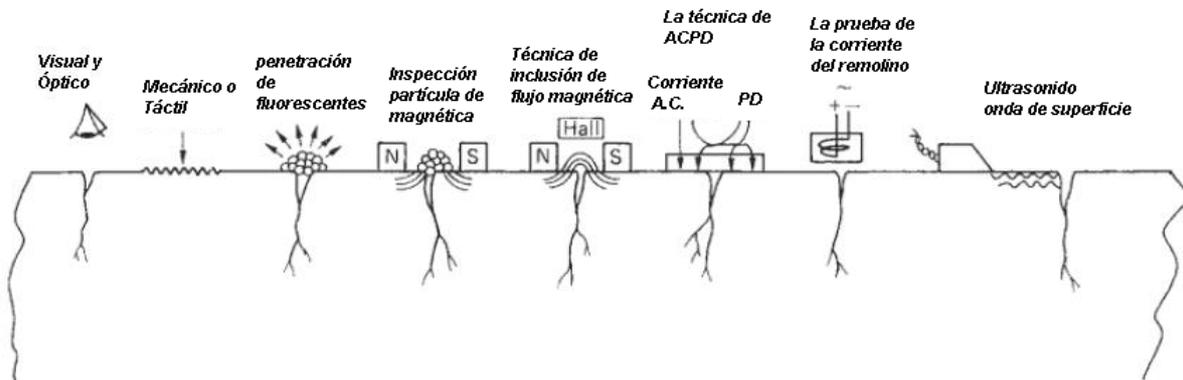


Figura 1. 2. *Detección de defectos superficiales*

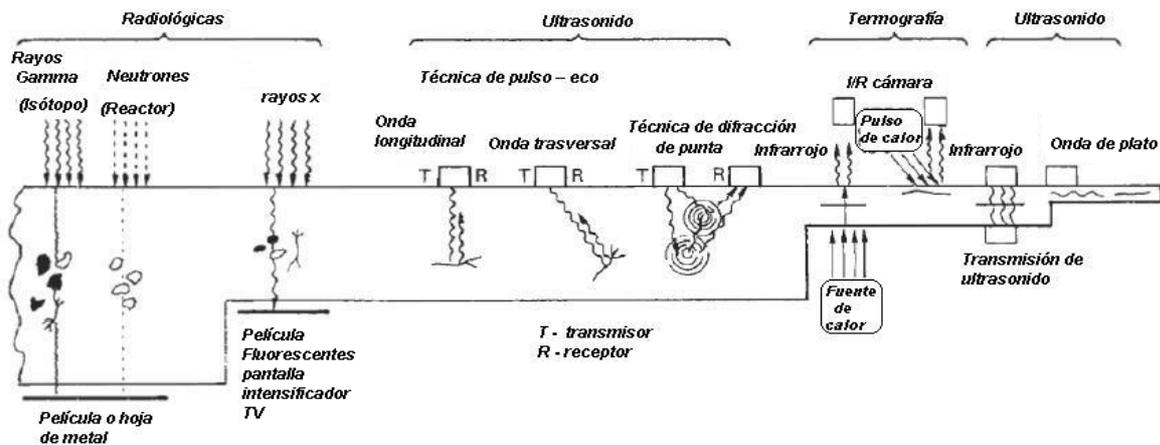


Figura 1. 3. Detección de defectos internos.

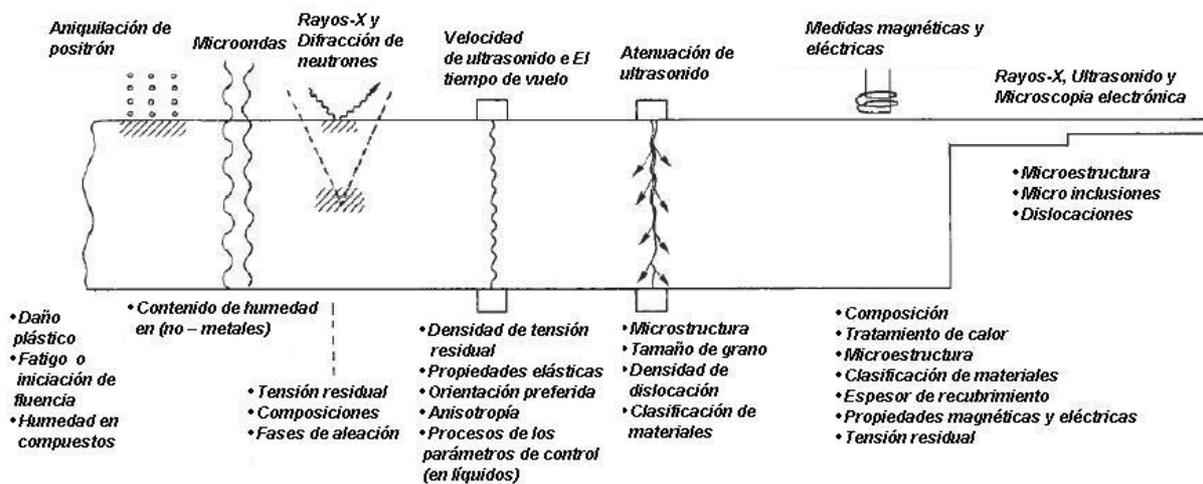


Figura 1. 4. Evaluación de cambios (micro)estructurales.

La evaluación no destructiva del hormigón *in-situ* es una cuestión importante para controlar a la durabilidad de las estructuras de la ingeniería civil. Las estructuras de hormigón que están expuestas al ataque por ambientes agresivos externos a la estructura, tales como: agua, cloruros, variaciones de intemperie, etc. que pueden reducir su durabilidad. En particular, cerca de la superficie del hormigón está directamente en el contacto con estos ataques agresivos. Este espesor del recubrimiento del hormigón es de 30-50 mm y esto esencialmente protege las barras del acero de la corrosión, que puede inducir macro-fisuras debido a la expansión del

acero. Un diagnóstico temprano de las patologías del recubrimiento del hormigón puede evitar reparaciones costosas (M. Chekroun 2009).

1.1.6.1. Ensayos No Destructivos por Ultrasonidos.

Entre todos los métodos de los ensayos no destructivos disponibles para el hormigón, el uso de las ondas ultrasónicas es de gran interés para evaluar propiedades mecánicas. La velocidad y la atenuación de tales ondas pueden ser usadas para determinar las propiedades viscoelásticas, tales como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, el coeficiente de Lamé, y también para caracterizar las propiedades microestructurales de los materiales como porosidad, tamaño de grano, micro-fisuras, etc. (M. Chekroun 2009).

El primer método empleado durante más de 50 años fue la determinación de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico (Kaplan, 1959, Malhotra, 1991, Zhou, 1995) consistiendo en la medición del tiempo tomado por un pulso ultrasónico para viajar por una muestra de hormigón.

Sin embargo, las medidas precisas y sus interpretaciones son difíciles debido a la naturaleza heterogénea del hormigón. El hormigón es básicamente formado de una mezcla de cemento, arena, agua y árido grueso. La arena está compuesta por partículas pequeñas con un diámetro medio inferior a 4 mm, mientras que los áridos son partículas más grandes con dimensiones que varían de unos milímetros hasta 20 mm. o incluso más grande. El mortero puede ser distinguido del hormigón porque se contiene sólo las pequeñas partículas (arena, cemento, agua) sin el árido grueso. El mortero y el hormigón también contienen poros y capilares, con tamaños de aproximadamente desde micras hasta unos milímetros. Estos poros pueden estar llenos de aire o agua. La porosidad de estos materiales de pasta de cemento puede ser directamente unida con la relación agua cemento por masa (a/c) de las proporciones de mezcla del hormigón. Todas estas heterogeneidades, del rango de variación del tamaño, se afectan fuertemente a la propagación de las ondas ultrasónicas, su influencia es dependiente a las frecuencias usadas (M. Chekroun 2009).

1.1.6.1.1. La técnica de transmisión- recepción (Tx-Rx)

Para detectar defectos en estructuras del hormigón con estas técnicas, se emplea equipamiento que permite medir la velocidad de propagación de los pulsos de ultrasonido. Por un lado, se produce la generación de un pulso ultrasónico y, por el otro, se registra el tiempo que tarda el pulso ultrasónico en atravesar un componente del hormigón. Los pulsos generados producen vibraciones frecuencias que están en el intervalo de 20 a 50 Hz, dependiendo del modelo del equipo. Los pulsos son repetidos a una velocidad de 50 a 150 Hz. Los equipos que operan a una frecuencia de 50 Hz no son recomendables para el uso de secciones menores de 150 mm de espesor y los que operan a 20 Hz su uso se debe limitar a secciones de más de 300 mm de espesor por los efectos que se producen en la interacción onda-material y la relación entre las dimensiones de la pieza bajo inspección y la longitud de onda para inspección (Naik 1979).

El contacto de los transductores con el hormigón se hace por medio de un acoplador acústico que puede ser cualquier material que posibilite la adaptación de las impedancias mecánicas. Estas sustancias pueden ser: una jalea de petróleo o gel o una pasta de caolín-glicol. Si la superficie del hormigón está muy rugosa se puede hacer una superficie lisa usando una capa delgada de yeso de parís o un mortero epóxido de secado rápido. Un transductor similar está acoplado al hormigón a una distancia medida del transductor transmisor que actúa como receptor, de manera que el tiempo de viaje entre los dos se mide electrónicamente.

Hay tres maneras de medir la velocidad del pulso a través del hormigón. En el método de transmisión directa, el transductor está conectado a la cara opuesta del miembro estructural. Este método se prefiere cuando es posible el acceso al lado opuesto del componente, ya que esto proporciona una trayectoria bien definida y una máxima sensibilidad. Algunas veces la geometría de los componentes requiere que se use el método semidirecto, en el cual los transductores están conectados en las superficies adyacentes (segundo método). El tercer método se utiliza cuando sólo se tiene acceso a una superficie y los transductores se colocan sobre la misma. En todos los métodos,

la velocidad de propagación de los pulsos a través del hormigón se ve afectada por el acero de refuerzo. Sin embargo, el análisis de respuesta de los pulsos permite evaluar de manera segura la calidad del hormigón. Esto se debe a que la velocidad de la onda del sonido se reduce por la presencia de porosidad (la cuál afecta a la resistencia) y por el agrietamiento interno, lo cual comúnmente es asociado con el deterioro del hormigón. La capacidad de las mediciones de sonido para detectar la porosidad también se puede usar para definir áreas de consolidación parcial o incluso para evaluar la eficiencia de la consolidación.

Construyendo una curva de calibración del hormigón que se está investigando, que correlacione la velocidad de los pulsos con la resistencia a la compresión del hormigón, se puede predecir la resistencia del hormigón dentro de un +/- 20% de error. Las mediciones de la velocidad de los pulsos se pueden emplear para detectar huecos (Manning 1985), y grietas, siempre y cuando las grietas sean aproximadamente perpendiculares a la dirección de la propagación del pulso.

Aunque las técnicas que miden la velocidad de los pulsos son útiles para la evaluación de defectos en el hormigón, estas proporcionan poca información acerca del acero embebido en el hormigón. De hecho, debido a que la velocidad de la onda en el acero es de 1.2 a 1.9 veces la del hormigón simple, la presencia del acero puede hacer extremadamente difícil la interpretación de los datos. Idealmente, se debe de seleccionar una trayectoria para evitar la influencia del acero de refuerzo, aunque esto, en la práctica, es poco probable en estructuras reales. Por consiguiente, es necesario aplicar factores de corrección para las mediciones realizadas. Cuando el eje de las varillas de refuerzo es perpendicular a la dirección de la propagación de la onda y la cantidad del acero de refuerzo es pequeña, la influencia del refuerzo también es pequeña. Cuando el eje de las varillas de refuerzo es paralelo a la propagación del pulso, la influencia del acero de las varillas puede ser importante. Normalmente, los métodos para calcular los factores de corrección están integrados en los equipos. Existe una amplia variedad de publicaciones en las que se tratan algunos procedimientos simples de inspección (Moore 1973, Knab 1983). En el caso del

refuerzo paralelo al pulso, es casi imposible hacer correcciones seguras. Además, los factores de corrección suponen un conocimiento del tamaño y localización de las varillas de refuerzo, lo cual no siempre está disponible para las estructuras en el campo (Fransesco, et al. 1999).

1.1.6.1.2. La técnica de pulso/eco (P/E)

En esta técnica, la fuente de pulsos y el transductor-receptor están montados sobre la misma superficie efectiva. Una vez emitido el pulso, el receptor queda “escuchando” las reflexiones que se producen del pulso emitido en el interior de la muestra. Estas reflexiones se producen por fenómenos de dispersión elástica de la onda emitida. Otras reflexiones de mayor amplitud se producen en los defectos internos y las fronteras externas o bordes, como se muestra en la Figura 1. 5. Si la velocidad de los pulsos se conoce, la distancia de un defecto o interferencia puede determinarse. Las técnicas convencionales de pulso-eco que se usan sobre el acero y otros materiales homogéneos, no son aplicables directamente al hormigón debido a su composición heterogénea y a la severa atenuación de los pulsos de alta frecuencia (Woodward 1984). Se han realizado continuos progresos en los estudios enfocados a la detección de defectos a nivel laboratorio, los cuales están siendo completados con estudios de patrones de ecos y con el desarrollo del equipo portátil para su uso en campo (Carino 1986). Por muchos años, se ha empleado un dispositivo de pulso-eco que utiliza un martillo Schmidt para transmitir una onda de baja frecuencia en el hormigón, particularmente para la valoración de los daños por fuego y para la evaluación de las reparaciones que implican la unión del nuevo hormigón respecto del viejo (Mouenow 1986) y Fransesco, et al (1999).

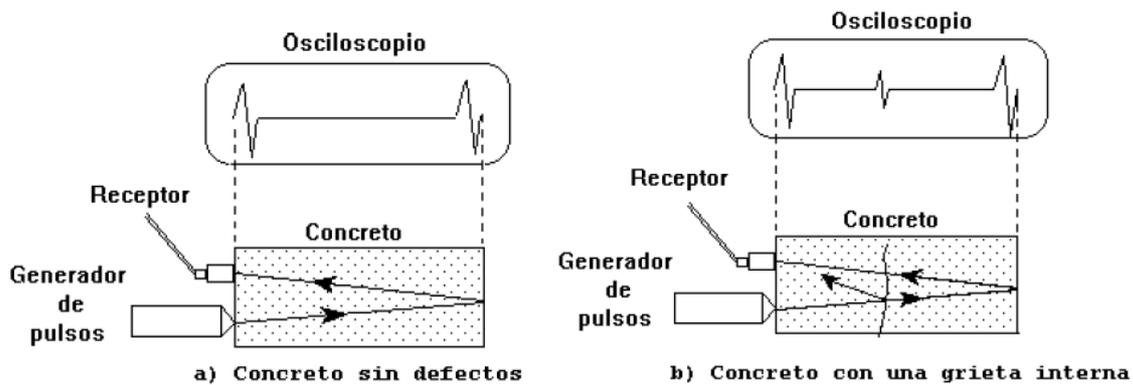


Figura 1. 5. Ejemplo de los pulso-eco reflejados cuando se presenta un defecto en el material.

1.1.6.2. Los efectos de las Propiedades del hormigón a la velocidad del pulso ultrasónico

1.1.6.2.1. Tamaño, clasificación, tipo y contenido del árido

Muchos investigadores han encontrado que la velocidad del pulso está afectada significativamente por el tipo y la cantidad de árido (Bullock and Whitehurst 1959, Sturup 1984, Swamy 1984, Anderson 1981, Jones 1954, Popovics 1990). En general, la velocidad del pulso en la pasta de cemento es menor que en el árido. Así pues, Jones 1954 concluyó que para la misma mezcla de hormigón y en el mismo nivel de resistencia a compresión, las gravas redondeadas (de río) presentan un velocidad inferior a las arenas trituradas de naturaleza granítica y caliza. A su vez, los finos calizos se traducen en una mayor velocidad que para el caso de las arenas de naturaleza silíceo-granítica.

Resultados adicionales por Jones (1962), Bullock and Whitehurst (1954), y Kaplan (1959) indican que para un nivel de resistencia del hormigón similar, a mayor contenido de árido resulta una mayor velocidad de pulso. Los efectos de la variación de la proporción del árido grueso en una mezcla de hormigón en la velocidad del pulso frente a la resistencia a compresión se muestran en la figura 1.6. (Jones 1962). Dicha figura muestra que para un valor determinado de la velocidad de pulso, cuanto mayor sea la relación árido-cemento, menor la resistencia a compresión.

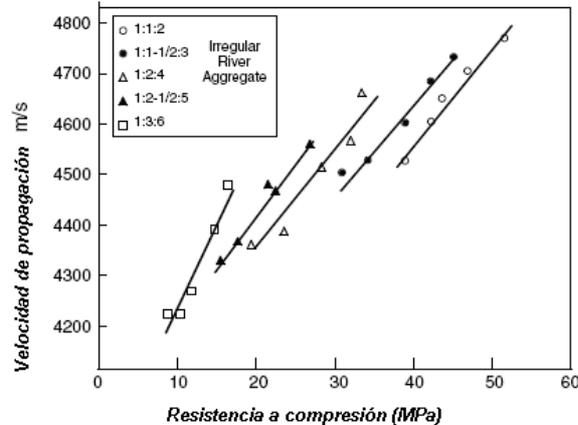


Figura 1. 6. Efecto de la relación del cemento, el árido fino, árido grueso sobre la relación entre la velocidad del pulso y la resistencia a compresión

1.1.6.2.2. El tipo de cemento

Asimismo, Jones (1954) concluyó que el tipo del cemento no tiene efecto significativo sobre la velocidad del pulso. El grado de hidratación, sin embargo, es diferente para los cementos diferentes y sí que influye en la velocidad del pulso. Así pues, cuando se aumenta el grado de hidratación, el módulo de elasticidad se aumenta y la velocidad de pulso también aumentará.

1.1.6.2.3. La relación agua/cemento.

Kaplan (1959) estudió el efecto de la relación agua-cemento (a/c) a la velocidad del pulso. Se ha demostrado que, cuando se aumenta la relación (a/c), la resistencia a compresión, a flexión y la velocidad de pulso disminuyen, suponiendo que no hay otros cambios en la composición del hormigón.

1.1.6.2.4. Aditivos.

Existen aditivos que influyen en la velocidad de pulso en la medida que afectan dichos aditivos al grado de hidratación de la muestra. Por ejemplo, la adición de cloruro de calcio reduce el tiempo de fraguado del hormigón y aumentará el grado de hidratación, lo que se traduce en un aumento de la velocidad del pulso.

1.1.6.2.5. La edad del hormigón.

El efecto de la edad del hormigón en la velocidad del pulso es similar al efecto en el desarrollo de la resistencia del hormigón. Jones 1954, analizó la relación entre la velocidad del pulso y la edad de curado del hormigón. Mostró que la velocidad aumenta muy rápidamente al principio, pero pronto se estabiliza a un valor constante. Esta tendencia es similar a la resistencia.

1.1.6.3. Ensayos no destructivos por ultrasonido en la ingeniería civil

En las últimas décadas, los ensayos no destructivos (END) han ganado mucha atención de los investigadores y los profesionales en el campo de la ingeniería civil. Son métodos fiables para evaluar las condiciones y los controles de la seguridad de las estructuras en ingeniería civil. Los ensayos no destructivos son mucho más convenientes y rentables en el caso de la comparación con los métodos de los ensayos destructivos.

Los métodos de los ensayos no destructivos en ingeniería civil se centran principalmente en el hormigón en términos de la determinación de las propiedades del material. Uno de los estudios en los que END se utilizó para determinar, a largo plazo, las propiedades de los materiales del hormigón fue presentado por Anderson y Sellos (1981). Con el fin de predecir la resistencia a 28 y 90 días se utilizó la velocidad del pulso a 1 y 2 días. En la primera fase experimental, seis diferentes mezclas fueron examinadas para determinar la viabilidad de la utilización de la velocidad del pulso y la resonancia de frecuencia para predecir resistencia a largo plazo y para seleccionar una combinación de procedimientos para la siguiente fase. En la segunda fase experimental, seis mezclas de cuatro combinaciones diferentes de árido se analizarán con equipos disponibles comercialmente. El efecto de las variables de composición, como el factor de cemento, relación agua-cemento, contenido de aire y el curado, se estudió en esta fase, analizando la relación entre la velocidad de pulso y la resistencia a compresión. Según los resultados de estas dos series de experimentos,

se sugirió que las variables de composición deben tenerse en cuenta para la predicción excelente 28 y 90 días de resistencia a compresión del hormigón.

En los trabajos de Pascale et al. (2003) también se utilizan diversas técnicas no destructivos y métodos destructivos para evaluar la resistencia a compresión real de diferentes mezclas de hormigón con una variación de 30 a 150 MPa. Del análisis de las relaciones que se obtuvieron entre la resistencia del cubo del hormigón estimada y los resultados para la velocidad del pulso, martillo de rebote, pull-out, la penetración de la sonda VICAT, la micro-métodos de extracción de muestras y los métodos combinados (Figura 1. 7). Se declaró que la sensibilidad de todos los métodos de los ensayos no destructivos disminuye con el aumento de la resistencia a compresión.

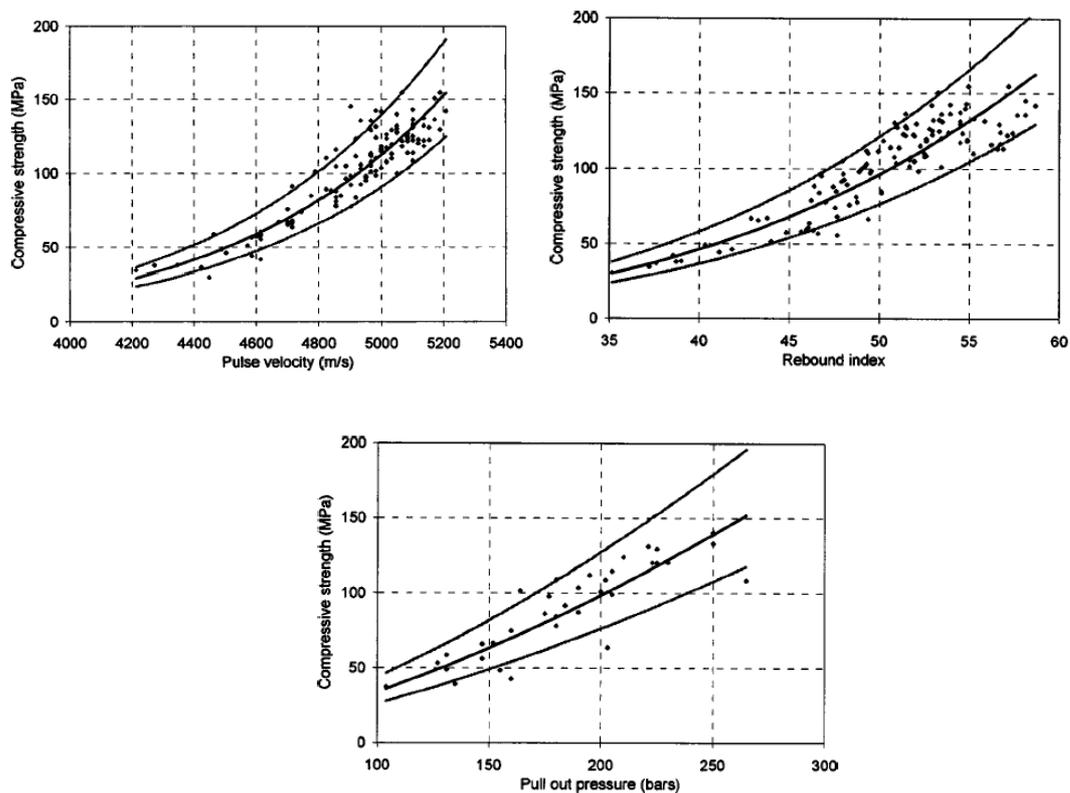


Figura 1. 7. La relación entre la Resistencia a compresión y (a) velocidad del pulso (b) el índice de rebote y (c) presión de pull-out (Pascale et al. 2003).

Toutanji (2000) estudió la propagación de las señales a través de diferentes tipos de anomalías en tableros de puentes de hormigón. Doce muestras diferentes con

distintos tipos y tamaños de grietas fueron ensayadas por un dispositivo de ensayo que genera pulsos ultrasónicos y mide el tiempo necesario para pasar de un transductor al otro. Estas señales fueron registradas por un ordenador personal conectado al sistema del ensayo de inspección ultrasónica, con el fin último de analizar el contenido espectral utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT) de las señales discretas adquiridas.

Basando en las comparaciones del tiempo y las señales de la forma de la onda en el dominio frecuencia, se concluyó que la técnica de la velocidad del pulso ultrasónico se puede utilizar para proporcionar información sobre las condiciones internas del tablero de un puente de hormigón y para estimar el tamaño de fisuras en los elementos estructurales. En un estudio similar, la viabilidad en la detección de los defectos internos de una viga de hormigón armado utilizando las ondas de ultrasonidos se investigó por Jung et al. (2002). La técnica propuesta fue un éxito en la detección de los defectos en las vigas de hormigón armado cuando no tiene ningún conocimiento previo sobre los lugares de las armaduras.

Además de sus aplicaciones en la detección de los defectos, los métodos de END por ultrasonido fueron utilizados por muchos investigadores para determinar las propiedades del material de hormigón. Voigt et al. (2003) utilizó la reflexión de las ondas ultrasónicas para determinar la resistencia del mortero y el hormigón a edades tempranas.

Tres lotes diferentes de hormigón y mortero fueron ensayados utilizando una placa de acero entre los materiales de cemento y el transductor para medir las reflexiones de la onda (figura 1.8 a). Estas reflexiones fueron obtenidas en el dominio tiempo y luego en el dominio transformado de la frecuencia utilizando el algoritmo de FFT (la figura 1.8 b).

Según dicha relación se puede apreciar una disminución del factor de reflexión versus la resistencia a compresión. Dicha disminución se relaciona linealmente con la ganancia de la resistencia del mortero y el hormigón a edades tempranas. Basado en

un enfoque similar, Akkaya et al. (2003) proponen una técnica para predecir la resistencia del hormigón a edades tempranas usando el factor de las ondas de ultrasonido.

No obstante, para determinar parámetros que tienen que ver con cambios microestructurales del material en base cemento, la mayor parte de trabajos abordan la cuestión a partir de la inspección ultrasónica de media y alta frecuencia, que se podía situar desde los 100 kHz hasta los 10 MHz.

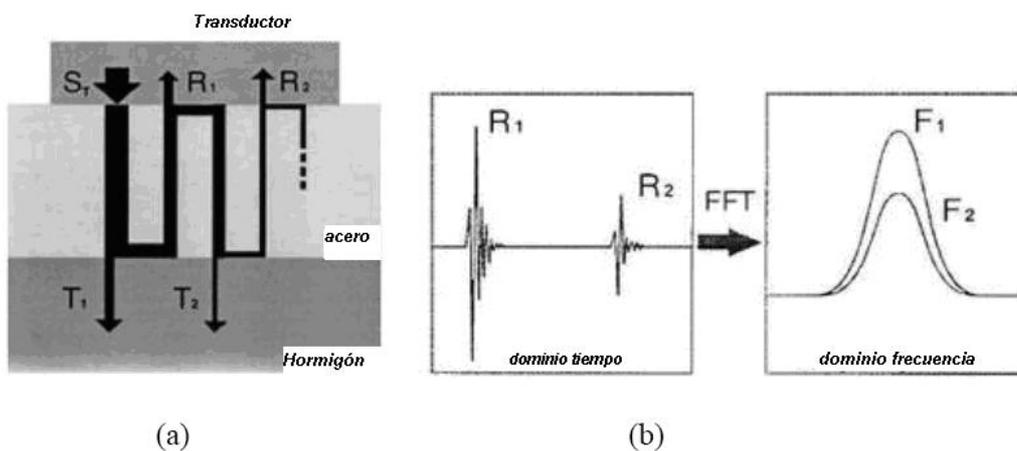


Figura 1. 8. (a) Representación esquemática de la reflexión múltiple y transmisión de ondas ultrasónicas en el enterase de acero-hormigón y (b) el dominio tiempo - frecuencia (FFT) de las ondas reflejadas (Voigt et al. 2003).

Así pues, cuando se trata de estudiar el fraguado-curado de morteros y hormigones desde tiempo casi cero se utilizan ultrasonidos de media frecuencia D. Aggelis (2005), Voigt (2005), G. Trtnik (2009), Los cambios microestructurales, en este caso, tiene que ver con las reacciones propias en el proceso de hidratación de los compuestos presentes en el cemento anhidro. Se pueden concluir que, por medio de estas técnicas, la energía transmitida se corresponde con la *maduración* de la estructura del material, aunque no hay una relación clara y evidente con las propiedades finales. Además estos métodos usan tanto la señal ultrasónica de paso, es decir, la onda longitudinal y transversal como las de Lamb, con la reflexiones en un medio conocido.

La durabilidad del hormigón está relacionada con la porosidad, lo que determina la intensidad de las interacciones del material con los agentes agresivos. Los poros y capilares dentro de la estructura se facilitan los procesos destructivos que generalmente comienzan en la superficie. M.G Hernández (2000), han utilizado la técnica de ultrasonido para estimación la porosidad del hormigón, esta técnica se basó del análisis del comportamiento mecánico del mortero, se utilizaron muestras de mortero con varias relaciones de agua/cemento. Los resultados experimentales se han obtenido con 2 MHz, 1 MHz y 500 kHz de transductores de 20 mm de diámetro que emiten en el modo longitudinal. Se concluyó que la velocidad de propagación de la onda ultrasónica correlaciona con la porosidad.

Lafhaj, Goueygou (2009) han estudiado la relación entre porosidad con los parámetros de ultrasonido. Ellos han elegido un rango de alta frecuencia de (0,6 – 1,2 MHz) para mejorar la sensibilidad de la onda ultrasónica a los cambios microestructurales. Se fabricaron muestras de mortero con varias relaciones agua/cemento (de 0,3 a 0,6) para obtener diferentes valores de porosidad, se utilizó el nitrato de amonio (6mol/l) para degradación acelerada. Se concluyó que la porosidad incrementa linealmente con relación (agua/cemento) y que la velocidad del pulso ultrasónico disminuye linealmente con la porosidad.

Punurai. M., et al (2007) utilizaron las técnicas de ultrasonido para caracterización cuantitativa de la porosidad capilar y el tamaño de los poros del aire ocluido en la pasta de cemento endurecida, se desarrolló un modelo para la dispersión del ultrasonido a partir de los valores experimentales de las medidas de atenuación ultrasónica. Se prepararon muestras de pastas de cemento con varias relaciones agua /cemento (0,3 - 0,6) para ayudar en la cuantificación de la relación entre la microestructura de la pasta de cemento y las características de la onda de ultrasonido. Se utilizaron dos transductores de frecuencia central entre 2 y 5 MHz para generar la onda longitudinal de ultrasonido. Se concluyó que hay muy buen acuerdo entre las predicciones del contenido del aire ocluido, obtenidos a partir de un procedimiento de inversión basado en el modelo teórico de atenuación, y el uso de las medidas de ultrasonido y las medidas del contenido del aire ocluido por métodos estándar como análisis petrográfico y el análisis gravimétrico.

Sin embargo, existe muy poca bibliografía que aborde el estudio de degradación de estos materiales utilizando técnicas de inspección ultrasónica, S. Ould Naffa, (2002), donde a partir de la propagación de ondas entre 0.5 y 1 MHz longitudinales, transversales y superficiales se puede correlacionar con la presencia de microfisuras que van apareciendo a lo largo del proceso de degradación en ataque ácido.

Desde el punto de vista del análisis por ruido granular, autores como Saniie et al. (1988), Rose et al.(1992), Turner et al.(1999) han modelizado el ruido granular de diferentes materiales porosos e isotropos, atendiendo a criterios físicos (deterministas) y estadísticos (1994). La dificultad estriba en poder ajustar estos modelos a materiales más heterogéneos como el mortero y hormigón. Para ello, se puede abordar esta problemática intentando establecer modelos de variación de ciertos parámetros frecuencia centroide transmitida, atenuación del ruido y velocidad de propagación con la porosidad Fuente J.V (2005). No obstante, se ha evidenciado que estos parámetros no dependen únicamente de la porosidad.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo de investigación es la evaluación de procesos de degradación microestructural en testigos de hormigón prefabricado sometidos a ambientes marinos, por inmersión en agua de mar, mediante el uso de técnicas no destructivas. Como objetivos específicos figuran:

- la relación de los parámetros no destructivos (parámetros de velocidad y atenuación, atenuación de ruido granular) con los cambios microestructurales,
- la relación entre los parámetros de evaluación de las técnicas de análisis físico-químico con los cambios microestructurales, y
- la relación entre los parámetros no destructivos (primeros) y los parámetros A F-Q (segundos)

Todo ello, para dos tipos de prefabricados muy similares, pero fabricados a partir de dos cementos, uno sulforresistente (CEM I 42.5 R/SR) y otro convencional CEM II-AL 42.5 R

El objetivo general de la línea de investigación es la obtención de un procedimiento de evaluación del ciclo de vida de los hormigones preparados y puestos en servicio en ambientes marinos. Para ello, se precisa la integración de diferentes técnicas de caracterización de las propiedades que afectan a los hormigones, entre las que se encuentran las técnicas no destructivas de análisis de ruido granular ultrasónico (RG).

Estas técnicas han demostrado una sensibilidad a ciertas características que varían a lo largo de los procesos de degradación de las estructuras de hormigón. Se precisa el conocimiento de los mecanismos físicos y químicos que tienen lugar en los procesos de degradación. Por otra parte, existen un conjunto de técnicas como la Difracción de rayos X (DRX), el análisis térmico diferencial (TG/ATD) y la microscopía electrónica de barrido (SEM) que permiten detectar y cuantificar los cambios microestructurales de este tipo de materiales.

La motivación principal para la realización de la investigación se basa en la no existencia de una metodología establecida para realizar una caracterización exhaustiva, a lo largo del ciclo de vida del hormigón preparado o prefabricado.

En este trabajo de investigación se analizará la incorporación de diversas metodologías, principalmente no destructivas y que permitan dar una respuesta conjunta al problema de la caracterización del hormigón, que se aborda desde muchos puntos de vista y que no hay una solución global al mismo. En particular, el trabajo plantea el estudio y seguimiento de los procesos de degradación del hormigón, los cambios microestructurales que se producen, mediante técnicas no destructivas y los análisis físico-químicos.

3. Materiales y desarrollo experimental.

3.1. Características de los materiales utilizados

3.1.1. Cemento.

Para llevar a cabo el presente trabajo, se ha utilizado dos tipos de cementos, cemento Pórtland de caliza II A-L 42,5 R según UNE-EN 197-1:2000, y cemento Pórtland resistente a sulfatos I 42,5 R/SR según UNE-EN 80303-1, procedente de la factoría CEMENTOS LA UNION. S.A planta de RIBARROJA DEL TURIA (Valencia), en la Tabla 3. 1. Se detallan las composiciones químicas de los cementos utilizados.

Cemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	* p.p.c
I 42,5 R/SR	19,80	4,30	3,83	63,50	1,13	2,48	0,62	0,10	3,58
II A-L 42,5 R	17,10	4,40	3,08	62,40	1,17	2,78	0,46	0,12	7,33

* p.p.c: Pérdida por calcinación

Tabla 3. 1. Composición química en peso (%) de los cementos utilizados.

3.1.2. Árido.

El árido utilizado es un árido de machaqueo de naturaleza caliza. Se ha empleado una grava de tamaño 4/10 y 8/20 mm, que ha sido suministrada caolines lapiedra (Lliria, Valencia).

Los ensayos físicos realizados para caracterizar el árido grueso y la arena natural se recogen en la Tabla 3. 2, Los ensayos de la granulometría se hicieron de acuerdo a la siguiente normativa (UNE-EN 933-1:97). En la Figura 3. 1, se muestra Granulometría de los áridos y de la arena utilizados.

Tamiz	Arena		Árido 10		Árido 20	
	% retenido	%Acumulado	% retenido	%Acumulado	% retenido	%Acumulado
28	0,0	100	0,0	100	0,0	100
20	0,0	100	0,0	100	0,4	99,6
16	0,0	100	0,0	100	21,3	28,7
14	0,0	100	0,0	100	37,8	62,2
12,5	0,0	100	0,0	100	63,6	36,4
10	0,0	100	0,0	100	92,4	7,6
8	0,0	100	7,6	92,4	99,1	0,9
5	0,0	100	60	40	99,2	0,8
4	1,2	98,8	89	11	99,2	0,8
2	76,4	26,6	96,3	3,7	99,2	0,8
1	92,4	7,6	97,8	2,2	99,2	0,8
0,5	95,3	4,7	98	2,0	99,2	0,8
0,25	96,5	3,5	98,1	1,9	99,3	0,7
0,125	98,3	1,7	99,3	0,7	99,9	0,1
0,063	99,8	0,2	99,9	0,1	100	0,0
Pasa	100	0,0	100	0,00	100	0,0
Modulo granulométrico	4,601		6,461		10,089	

Tabla 3. 2. Composición granulométrica del árido y de las arenas utilizadas.

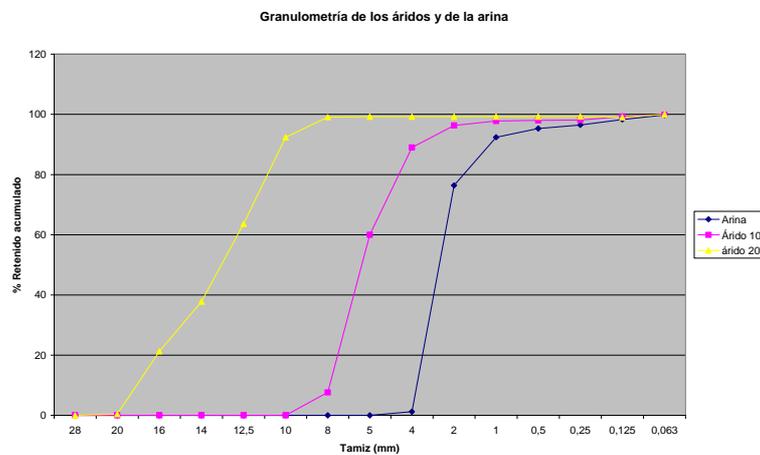


Figura 3. 1. Granulometría de los áridos y de la arena utilizados.

3.1.3. Agua

El agua utilizada en la preparación del hormigón es agua potable, en la Tabla 3. 3 se presenta su análisis.

Acidez, expresada por su PH	Sustancias solubles	sulfatos	cloruro
8,41	0,96 gr/l	0,25 gr/l	0,10 gr/l

Tabla 3. 3. Análisis del agua de la amasada.

3.1.4. Aditivos

Se ha utilizado Sika Paver® HC-1 que cumple los requisitos establecidos en la norma (UNE-EN-934-2). Los datos técnicos suministrados por el fabricante están recogidos en la Tabla 3. 4.

<i>Composición química</i>	<i>Mezcla surfactante</i>
<i>Densidad</i>	<i>1,01 + 0,01 kg/l (a +20 °C)</i>
<i>pH</i>	<i>7</i>
<i>Contenido en cloruro</i>	<i>≤ 0,1%</i>
<i>Dosificación</i>	<i>0,2% - 0,5% del peso del cemento.</i>

Tabla 3. 4. Características del SikaPaver

3.2. Desarrollo Experimental

3.2.1. Dosificación del el hormigón y fabricar los marcos.

Se han fabricado dos marcos de hormigón de 2000 x 1500 x 2000 mm (Figura 3. 2). En una fábrica de hormigón prefabricado GADEA HNOS (Valencia-España).

La Figura 3. 5, se muestra las dosificaciones de los marcos, donde, (marco 1) es el que tiene cemento CEM I 42.5R/SR y (marco 2) es el que tiene cemento CEM II A-L 42,5 R. El curado de los marcos es en condiciones normales ni agua ni vapor.

Dosificación	Marco 1	Marco 2
Arena triturada (kg/m³)	900	900
Grava 20 (kg/m³)	508	508
Grava 10 (kg/m³)	700	700
Relación Agua /cemento	0,35	0,35
Cemento (kg/m³)	325	300
Aditivos (l/m³)	1,3	1,3

Tabla 3. 5. Dosificación de los Marcos bajo análisis



Figura 3. 2. *Fotografía de los marcos bajo análisis en (Gadea Hnos. S.L.)*

3.2.2. Obtención de los testigos a analizar

La extracción de las probetas-testigo se realiza mediante una perforadora, generalmente eléctrica, la cual dispone de una corona circular en uno de cuyos extremos se encuentra el elemento de corte, que habitualmente suele ser de diamante. La perforadora transmite a la corona una rotación a un cierto número de revoluciones, que por desgaste y abrasión del elemento de corte sobre el hormigón, va alojando en su interior el testigo de hormigón. Para evitar un calentamiento excesivo y el desgaste prematuro de la corona, se inyecta continuamente un pequeño caudal de agua por el interior de la corona, y de este modo, se consigue su refrigeración.

La extracción y el tallado, no deben perturbar la adherencia entre el mortero y el árido grueso. Por ello el hormigón debe tener una resistencia suficiente en el momento de la extracción. Se recomienda que la edad del hormigón sea superior a 28 días.

El diámetro de la corona a emplear para la extracción del testigo, debe ser tal que el diámetro del testigo sea como mínimo 3 veces el tamaño máximo del árido. Las coronas usuales permiten la extracción de testigos de diámetros 25, 50, 75, 100, 125 y 150 mm. (UNE 83-302-84), en este trabajo la corona utilizada es de diámetro 75mm.

La longitud del testigo a extraer debe permitir que tras el tallado de sus caras, exista una relación entre la altura y el diámetro de 2, o lo que es lo mismo, que el testigo una vez tallado tenga una esbeltez 2. En el caso de que la esbeltez resulte menor que 2, se deberán corregir los valores de rotura obtenidos multiplicándolos por un factor para referirlos a esa esbeltez (UNE 83-304-84). En la Figura 3. 3 y Tabla 3. 6, se muestra el procedimiento de sacar los testigos y los números de los testigos para los ensayos realizados.



Figura 3. 3. *Fotografías del Proceso de Extracción de los testigos y su disposición en el laboratorio para la realización de las inspecciones no destructivas*

Ensayo	Nº. de testigos para los dos tipos de cemento	esbeltez
<ul style="list-style-type: none"> • Ultrasonido (Tx-Rx) • Ultrasonido (Pulso-eco) • Porosidad abierta • Tomografía 	28 × 2 = 56	1
<ul style="list-style-type: none"> • Impedancia eléctrica (IE) • Resistencia a compresión 	28×2 = 56	1.5
<ul style="list-style-type: none"> • Espectroscopia electrónica de barrido (SEM) 	28×2 = 56	2
168 testigos degradación por agua de mar		

Tabla 3. 6. Se muestra los números de los testigos para los ensayos realizados, (ataque por agua de mar).

3.2.3. Preparación el agua de mar en laboratorio.

Se preparó el agua de mar en el laboratorio de sal de mar de concertación (3,5% g/l) a agua destelada, la Tabla 3. 7. Se muestra las composiciones del agua de mar donde se degrada las probetas del hormigón prefabricado. Después del análisis del agua de mar el tiempo necesario para cambiar la disolución será cada dos meses (Tabla 3. 8)

Parámetro	Resultado
Bicarbonatos (HCO ₃)	173 mg/l
Bromato	<1 mg/l
Cloruros	21200 mg/l
Fluoruros	<10 mg/l
Sulfatos	2690 mg/l
Boro disuelto	4590 µg/l
Calcio disuelto	453 mg/l
Potasio disuelto	614 mg/l
Magnesio disuelto	1250 mg/l
Sodio disuelto	10300 mg/l
Estroncio disuelto	9310 µg/l

Tabla 3. 7. Las composiciones del agua de mar.

Parámetro	Resultado
Bicarbonatos (HCO ₃)	79.6 mg/l
Bromato	<1 mg/l
Cloruros	15800 mg/l
Fluoruros	<10 mg/l
Sulfatos	2030 mg/l
Boro disuelto	3800 µg/l
Calcio disuelto	123 mg/l
Potasio disuelto	516 mg/l
Magnesio disuelto	908 mg/l
Sodio disuelto	7820 mg/l
Estroncio disuelto	2880 µg/l

Tabla 3.8 . Las composiciones del agua de mar después dos meses de sumergir los testigos del hormigón

3.2.4. Ensayo de la resistencia a compresión.

Los testigos de hormigón realizados de diámetro 75 mm y altura 150 mm, para realizar el ensayo de rotura a compresión. El ensayo se realiza siguiendo la norma UNE 83.304/84.

La prensa utilizada para el ensayo de compresión ha sido de la casa Ibertest, modelo H/B150DAVA. La Figura 3. 4 y Figura 3. 5 se muestran las probetas refrentadas y el ensayo de resistencia a compresión.

La máquina de ensayos dispondrá de un sistema de regulación de aplicación de cargas, de modo que la velocidad de carga produzca un incremento de la tensión media sobre la probeta de $5 \pm 2 \text{ kp/cm}^2/\text{s}$ ($0'5 \pm 0'2 \text{ MPa/s}$).

La dimensión menor de la superficie de los platos de carga será superior a un 3%, como mínimo, al diámetro de la probeta a ensayar. El plato inferior tendrá marcas que sirvan de guía para un correcto centrado de la probeta.

La lectura de cargas debe realizarse apreciando, al menos el 1% del resultado del ensayo. Para que sean válidas las lecturas obtenidas, deben estar comprendidas entre el 10% y el 90% de la capacidad máxima de la escala empleada. En todos los casos el elemento de lectura debe disponer de un indicador de la carga máxima alcanzada.



Figura 3. 4. La máquina de rotura por resistencia a compresión.



Figura 3. 5. Los testigos refrentados

Los testigos de hormigón cuya relación altura/diámetro sea inferior a 2, deben corregirse mediante el correspondiente factor de corrección.

La altura de la probeta es la determinada tras su tallado y refrentado, incluyendo el espesor de éste, se medirá con una precisión mínima de 1'0 mm. Esta medida será la empleada para calcular la esbeltez. El diámetro de la probeta se determina como media de dos medidas tomadas en dos diámetros situados en los puntos de mínima sección y realizados con una precisión de 0'1 mm.

3.2.5. El ensayo de porosidad abierta.

Se toman tres testigos de hormigón para determinar la porosidad, se realiza el siguiente procedimiento.

Se sumerge la muestra en un recipiente con agua, cubriéndola en su totalidad y dejándola sumergida durante 24 horas.

Después de 24 horas, saturamos la muestra haciendo vacío mediante una bomba para que extraiga todo el aire de la muestra Figura 3. 6. En el desecador se deja otras 24 horas. El indicativo visual de que la muestra estará saturada es cuando sobre su superficie no quede ninguna burbuja de aire. Una vez saturada se seca su superficie con un paño poco absorbente e inmediatamente se pesa, obteniendo la m_{sat} .

Se vuelve a pesar la muestra sumergida, en una balanza hidrostática, a este valor se le denomina $m_{b,h}$.

Por último, la muestra se introduce en una estufa a 105-110 °C, durante 24 horas. Esta temperatura resulta adecuada para hormigón, aunque para pastas de cemento y morteros puede provocar microfisuración si se aplican gradientes térmicos elevados. Una vez seca, se saca de la estufa y se introduce en un desecador hasta que su temperatura se iguale con la del ambiente, y no tome humedad del ambiente. Una vez se ha igualado la temperatura realizamos la última pesada que se denomina m_s .

La balanza utilizada para realizar las pesadas es una balanza de precisión 0.1 g y el agua utilizada es agua destelada.

$$\text{Porosidad} = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_{b,h}} \times 100$$

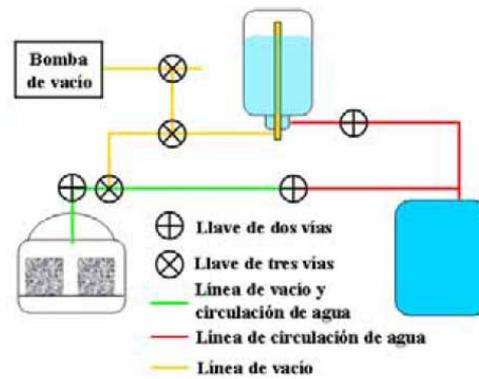


Figura 3. 6. Montaje experimental empleado para absorción de agua por inmersión a vacío.

3.2.6. El ensayo de ultrasonido transmisión-recepción (Tx-rx) y ruido granular (pulso/eco)

Para la adquisición de las señales ultrasónica se utilizó el siguiente equipamiento:

- Equipo panametrics 5058PR, emisor-receptor de pulsos de alto voltaje y elevada ganancia, cuyo ancho de banda comprende todas las frecuencias de inspección (de 10 kHz a 10 MHz)
- Osciloscopio Tektronics TDS3012 para visualización de las señales.
- Un transductores dual con frecuencia de 1MHz A703 de Panametrics para inspección las probetas por el método de ruido granular.
- Un transductor con frecuencia de 3.5MHz V413 Panametrics para inspección las probetas por el método de ruido granular.
- Dos transductores con frecuencia de 1MHz K1SC de Krautkammer para medidas de velocidades de propagación (onda longitudinal).
- Dos transductores con frecuencia de 500 kHz V151 Panametrics para medidas de velocidades de propagación (onda trasversal).

El la Figura 3. 7 y Figura 3. 8 se muestra el equipo utilizado y los transductores realizados.



Figura 3. 7. Imagen del equipo de ultrasonido Panametrics 5058PR y Osciloscopio Tektronics TDS3012.



Figura 3. 8. Los transductores Utilizados en los ensayos por ultrasonido (Tx- Rx) y (Pulso-eco)

El transductor-emisor envía un pulso ultrasónico a través del material mientras que en el otro extremo del material inspeccionado, un transductor similar recibe la señal ultrasónica, transformándola en eléctrica.

Las características de atenuación y cambios de velocidad del medio por el que se ha propagado la señal proporcionan información con respecto a la estructura interna del material, presencia de grietas, oclusiones, faltas de homogeneidad, etc.

En particular, el pulso ultrasónico durante la propagación por la microestructura porosa y la matriz cementicia se va atenuando y distorsionando. El efecto de atenuación se muestra mediante la absorción de parte de esa energía por la propia microestructura, El efecto de distorsión se manifiesta mediante la dispersión del pulso en los “scatters” o dispersores. Los principales dispersores son los poros de gran tamaño o aire ocluido. Otro agente dispersor sería los propios granos de arena y los cantos o grava, éstos aunque pueden ser de mayor tamaño resultan tener menor contribución a la atenuación final pues su impedancia ultrasónica es más parecida a la de la matriz cementicia que los poros de aire.

Para la estimación de la velocidad ultrasónica, se eligió el método de doble cruce por cero. Este método consiste en tomar los tiempos de cruce por cero de la señal, habiendo restado convenientemente el posible offset. Una vez tomado el tiempo de propagación de los cruces t_1 o primer cruce por cero, y t_2 como segundo cruce por cero.

$$t_{corr} = 2 \cdot t_2 - t_1$$

Así, se pretende eliminar el efecto filtro paso-bajo del material muy presente en medios muy dispersivos y altamente atenuantes. Suele recibirse un primer pulso con una oscilación o pulsación lenta o de menor frecuencia. Esta pulsación presenta una lenta subida en la forma de onda y es ahí donde los métodos de estimación por umbral fallan, mientras que en el cruce por cero, la pendiente es la mayor, por lo que las estimas del tiempo de propagación resultan con menos sesgo y varianza.

Por el tema de heterogeneidad de hormigón se ha realizado en cada probeta de los testigos Figura 3. 9 el siguiente:

Para el método transmisión-recepción (Tx-rx) cuatro medidas Axiales y doce medidas Radiales, mientras que para el método Ruido granular (pulso/eco) seis medidas Axiales y veinticuatro medidas Radiales.

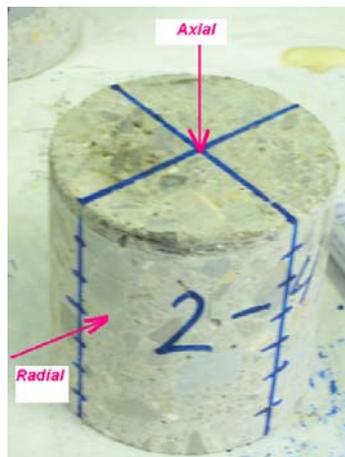


Figura 3. 9 a Las medidas axiales y radiales para testigo

El análisis de ruido granular ultrasónico se realiza en el dominio tiempo-frecuencia a través de los espectrogramas de las realizaciones y que promediaremos en los casos de realizaciones o medidas que procedan de las mismas microestructuras.

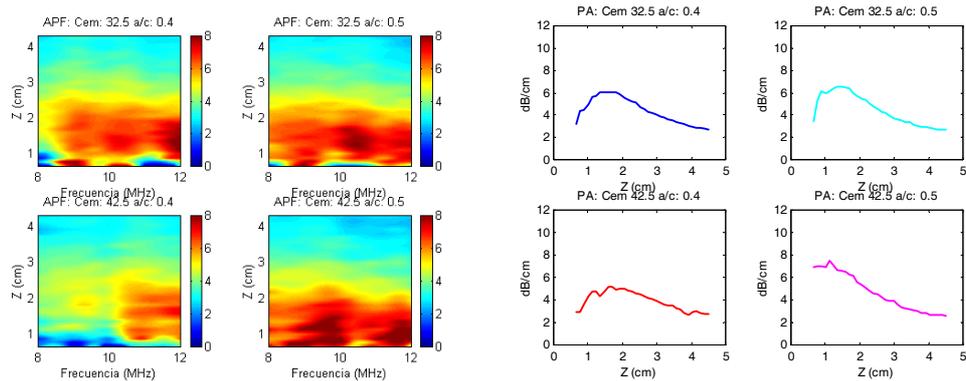


Figura 3. 10. Espectrogramas (Distribuciones tiempo-frecuencia del ruido granular) y promediado en frecuencia para obtener un Perfil de atenuación con la profundidad del pulso.

Los parámetros que se pueden extraer de los Perfiles de Atenuación (PA) analizados son: Área del Perfil de Atenuación (APA), Promedio de profundidades cortas M_{APA} , Potencia del ruido granular (Pot_Rg); Profundidad de corte a la que desciende la frecuencia máxima presente en el espectrograma (Zf_{max}) y Profundidad donde cae la frecuencia centroide Zfc , más la atenuación en el dominio tiempo $a(t)$;

3.2.7. Tomografía ultrasónica.

Las inspecciones se han realizado en las instalaciones del Instituto de Automática Industrial del C.S.I.C mediante sistemas automatizados de barrido sobre las probetas sumergidas en agua de mar y que para la medida se inspeccionaron en una piscina de ultrasonidos (sumergidas en agua). Se han empleado transductores de banda ancha Panametrics v413, de 500 kHz, emitiendo en modo longitudinal. Se ha utilizado un sistema basado en la tecnología SENDAS® para la generación y recepción de las señales ultrasónicas, utilizando una frecuencia de muestreo de 20 MHz. Se han realizado dos tipos de inspecciones en transmisión, en sentido radial y en sentido axial (Figura 3. 11).

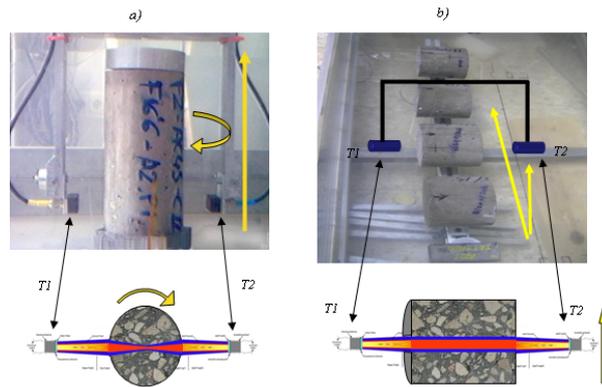


Figura 3. 11. a) *Inspección radial.* b) *Inspección axial.*

Para realizar las inspecciones en sentido radial, se ha diseñado un sistema fácilmente transportable, actualmente en fase de prototipo, que permite inspeccionar automáticamente las probetas o testigos en el mismo lugar de fabricación o extracción. El sistema automatizado permite realizar dos movimientos: uno de rotación con centro en el eje de la probeta cilíndrica, y otro de traslación a lo largo de la altura de la misma, movimientos señalizados con las flechas amarillas de la Figura 3. 11 a. La inspección de una probeta de hormigón se realiza en 10 minutos con una rejilla de barrido de 2 mm. en altura y una separación entre diámetros de 5°.

Para la inspección axial (Figura 3. 11 b) se utilizó un sistema automatizado estándar de tres ejes cartesianos, barriendo la probeta en dos de ellos. La rejilla de inspección fue de 4x4 mm.

Para el cálculo de velocidad se ha empleado el algoritmo de doble cruce por cero (Acebes, M. et al. 2008). Este algoritmo permite disminuir la dependencia de la medida de velocidad de la amplitud del eco recibido ya que la velocidad, a través de la estimación del tiempo de vuelvo, se ve afectado por la distorsión del pulso ultrasónico que es la energía de excitación utilizadas. Esto supone una ventaja respecto de los sistemas usuales de medida de velocidad ultrasónica en hormigón.

3.2.7.1. Imágenes radiales o diametrales

En la inspección radial el campo ultrasónico que atraviesa el material se propaga a lo largo de aproximadamente dos secciones cónicas centradas en un diámetro de la probeta (Figura 3. 11 a).

Por consiguiente cada píxel de los mapas o imágenes que se crean corresponde a la información ultrasónica de una zona del material asociada a un diámetro a una altura determinada de la probeta. La imagen creada representa la información de acuerdo al parámetro elegido de la señal recibida, en este caso, se ha utilizado el parámetro más usual, la velocidad ultrasónica de onda longitudinal. (Figura 3. 12)

3.2.7.2. Imágenes axiales

Se han obtenido mapas de velocidad y espesor para cada una de las rodajas de las probetas, según el esquema de inspección representado en la Figura 3. 11. Por tanto, cada píxel de las imágenes representadas corresponderá a la información ultrasónica de un eje coaxial al eje de revolución de la probeta.

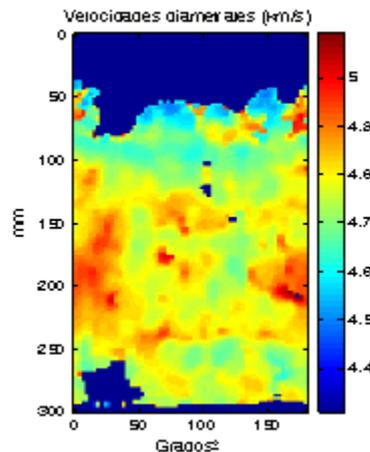


Figura 3. 12. Mapas de la información diametral de una probeta de hormigón: velocidad ultrasónica (onda P)

Las imágenes formadas mediante este modo de inspección permiten diferentes modos de representación como puede verse en la Figura 3. 13, donde aparece una representación 3D de la probeta y un corte por nivel. Para representar el corte por nivel se ha asignado a cada diámetro de la probeta la velocidad media en transmisión en dicho diámetro lo que nos permite una representación del corte de

la probeta a dicha altura. Este tipo de representaciones no nos proporciona más información que la imagen de partida al no haberse utilizado técnicas de composición tomográfica, pero nos permite resaltar cierto tipo de información, por ejemplo, localizar más fácilmente los daños en la probeta, como será nuestro objetivo con el uso de esta técnica, con las imágenes 3D, o comprobar la heterogeneidad del material a una altura determinada.

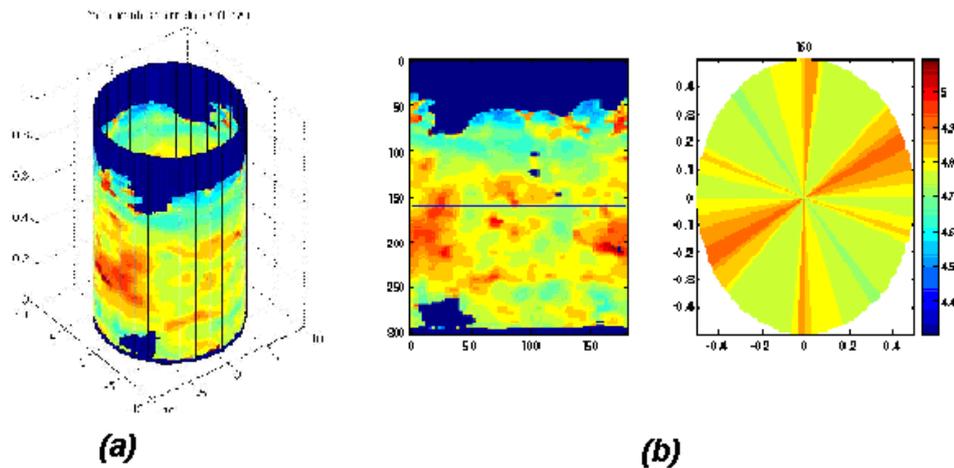


Figura 3. 13. Representaciones de la información diametral a) representación 3D b) Corte en la altura 70mm.

3.2.8. La Microscopía Electrónica de Barrido

La caracterización microestructural se lleva a cabo con un microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo (HITACHI S-4800 II) y espectroscopia dispersiva EDS, (Figura 3. 14).

Las imágenes se obtienen mediante el equipo SEM a partir de los electrones secundarios generados en las siguientes condiciones:

- Voltaje de 10 kV, Intensidad de 15 μ A
- Distancia de trabajo de 15mm

Preparación de la muestra

Para el estudio de la microestructura del hormigón atacado, se cortó desde el vértice exterior (zona atacada) perpendicularmente al eje longitudinal de las probetas cilíndricas, una sección plana hasta la parte interior de la probeta (zona libre de ataque), mediante la ayuda de una sierra de disco de diamante. Se pone las

muestras en acetona, para detener el proceso de hidratación, de modo que se pueda correlacionar las imágenes y microanálisis obtenidos con SEM y EDX, con los valores de resistencia obtenidos en la caracterización mecánica para las mismas edades. Las porciones triangulares obtenidas se introdujeron en pequeños moldes cilíndricos y posteriormente, se relleno el molde con resina (para no influir en la composición del hormigón atacado) y haciendo vacío durante 15min, transcurrido este tiempo se procede al pulido y al recubrimiento de las mismas. Una vez obtenidas las pastillas de resina se pulen las superficies a estudiar, y se cubren con grafito. El grafito se utiliza como puente entre el soporte conductor de electrones y la muestra. La Figura 3. 15 se muestra una muestra preparada para el análisis por (SEM).

Se ha empleado como puente entre el soporte conductor y la muestra de análisis un puente de plata y las muestras se han recubierto con grafito (C), a fin de metalizarlas. La zona recubierta con Carbono se ha realizado un mapeo elemental (SEM-EDS), así como el microanálisis EDX (Quantax 800, Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany) sobre diferentes zonas de la muestra, por presentar una diferente textura o coloración



Figura 3. 14. *El equipo de Microscopía Electrónica de Barrido.*



Figura 3. 15. Zona de análisis en una muestra puesta en resina para el análisis por (SEM).

3.2.9. Porosimetría de Hg

La porosimetría por inyección de Hg es una técnica indirecta para la caracterización del sistema poroso de los materiales, obteniéndose fundamentalmente a partir de ella la distribución de la porosidad en función del tamaño aparente de acceso a los poros, la densidad real y esquelética del sistema y una visión global de la distribución de tamaños de poros así como de los cuellos de conexión entre los mismos.

El ensayo presenta gran utilidad en el análisis de la evolución del sistema poroso de un mismo material sometido a distintos procesos físicos o químicos (alteración, tratamientos, etc.) y como ensayo de control de calidad.

Con esta técnica se va a analizar la distribución de tamaño de poro, la porosidad conectada y tamaño de poro medio (en volumen) para poder evidenciar los cambios que se producen por cementos y según el proceso de degradación por inmersión en agua de mar

4. Resultados y discusión

En esta parte de este trabajo se realiza el seguimiento del proceso de degradación del hormigón en el agua de mar, utilizando la atenuación ultrasónica, la velocidad del las ondas longitudinales, transversales y tomografía ultrasónica como parámetros no destructivos y ultrasónicos. Estos parámetros se correlacionarán con los parámetros de caracterización realizados, todo ello con el objetivo de conocer cómo evolucionan los mismos a lo largo del proceso de degradación y su correlación entre unos y otros.

Los valores representados son los valores medios de cada tipo de probeta, incluso para distintas testigos y el valor de desviación típica es el relativo al conjunto de medidas que intervienen en la media de los valores representados.

4.1. Porosidad y Resistencia a compresión

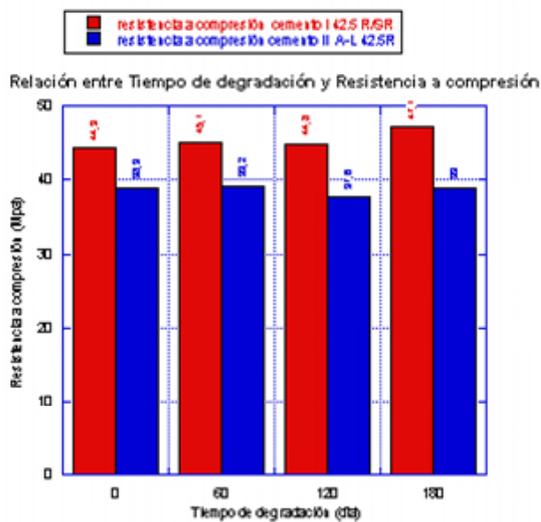


Figura 4. 2. Relación entre el tiempo de degradación y la Resistencia a compresión.

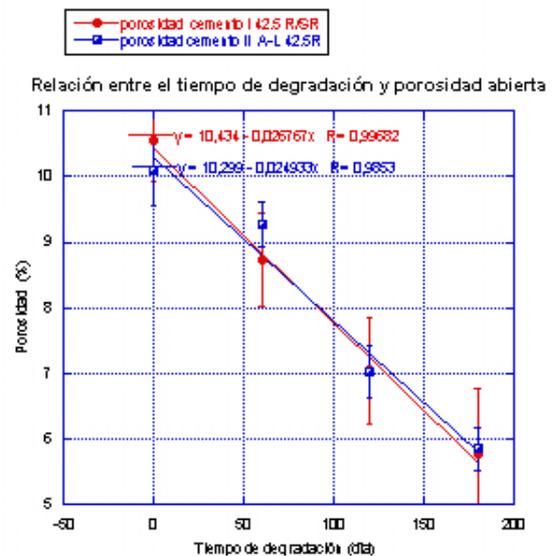


Figura 4. 1. Relación entre el tiempo de degradación y la Porosidad abierta.

La Figura 4. 1 y Figura 4. 2. Se muestran la relación entre dos parámetros que caracterizan las muestras para 3 edades de degradación (60, 120 y 180 días) y el control. Los resultados que se observan es que la porosidad abierta al agua disminuye a lo largo del tiempo hasta 180 días de degradación, La resistencia a

compresión no varía drásticamente en ninguno de los puntos de control de los que se disponen datos experimentales.

Para el caso de los resultados de porosidad obtenidos con Porosimetría de Mercurio se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 4. 1. Porosidades conectadas Hg			
Días	0	60	180
Cem I SR	7,22	4,68	6,67
Cem II R	6,96	4,99	5,66

Tabla 4. 2 Tamaño de Promedio			
Días	0	60	180
Cem I SR	0,032	0,021	0,0167
Cem II R	0,0265	0,0202	0,013

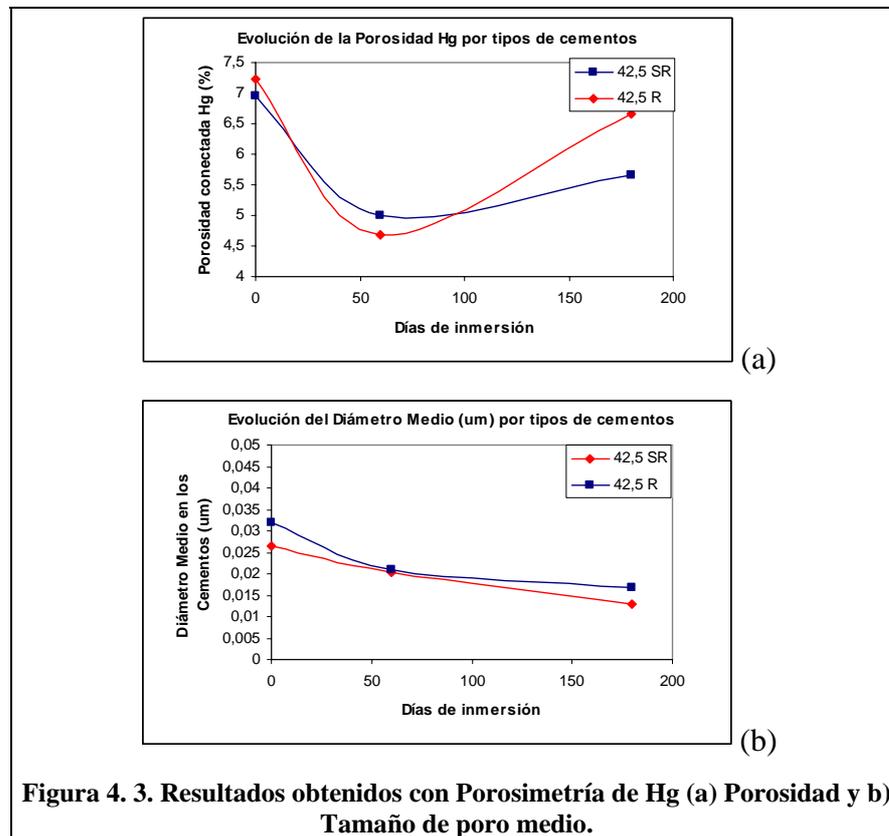
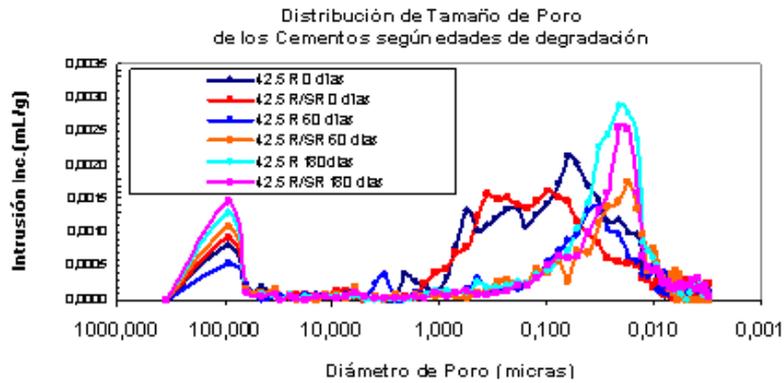
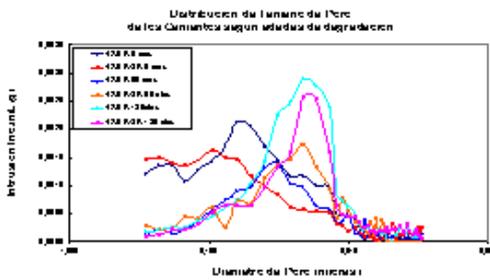


Figura 4. 3. Resultados obtenidos con Porosimetría de Hg (a) Porosidad y b) Tamaño de poro medio.

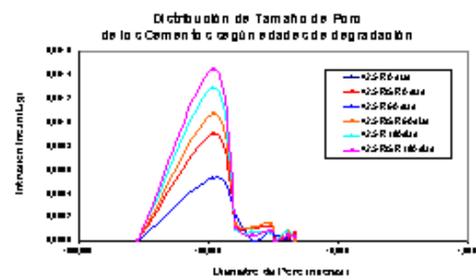
Se observa que los cementos presentan un porosidad conectada al Hg parecida, aunque para el Cemento I 42.5 R/SR o sulforresistente tiene un porosidad a 180 días superior. Asimismo, la figura muestra en (b) que el tamaño promedio de poro es mayor en el Cem II-AL 42.5 R que en el Cem I 42.5 R/SR.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. 4. Distribución de tamaños de poro, (a) total, (b) porosidad capilar y (c) macroporos

Se puede observar que existen dos poblaciones de poros bien definidas. En principio, las frecuencias de inspección con ruido granular (1 MHz y 3.5 MHz) son más sensibles al macroporo (100-300 micras) por lo que se espera un incremento en los valores del APA a 180 días. Por otro lado, se puede observar en la figura anterior (b) que para el caso de la porosidad capilar, se produce un desplazamiento hacia poros más pequeños a medida que la probeta está en presencia de agua de mar, es decir, a edades mayores de inmersión. Resulta como si la meseta que tienen las probetas control, se deshiciera y se produjeran, por un lado, más macroporo (100-300 micras) y más microporo cercano a 0.015 micras.

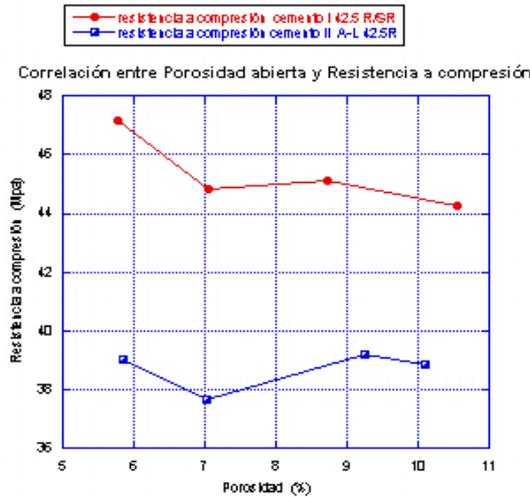


Figura 4. 5. Correlación entre Porosidad abierta y Resistencia a compresión.

En la Figura 4. 5. Se muestra la correlación entre la porosidad y la resistencia a compresión, en cualquier caso, sí que hay una reducción efectiva y paulatina de la porosidad, pero que no afecta en la misma medida a la resistencia a compresión. Tal en el cemento I 42.5 R/SR como II A-L 42.5.

4.2. Porosidad y Ultrasonido Ruido granular

Evolución de la porosidad respecto de dos parámetros de ruido granular como son la atenuación del ruido estructural a 1 MHz y 3.5 MHz.

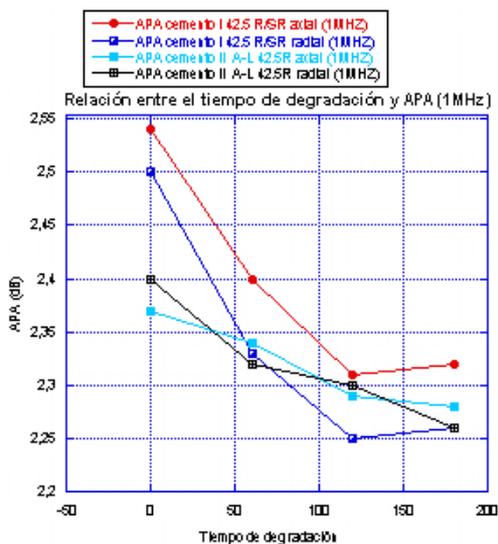


Figura 4. 6. Relación entre el tiempo de degradación y APA (1MHz).

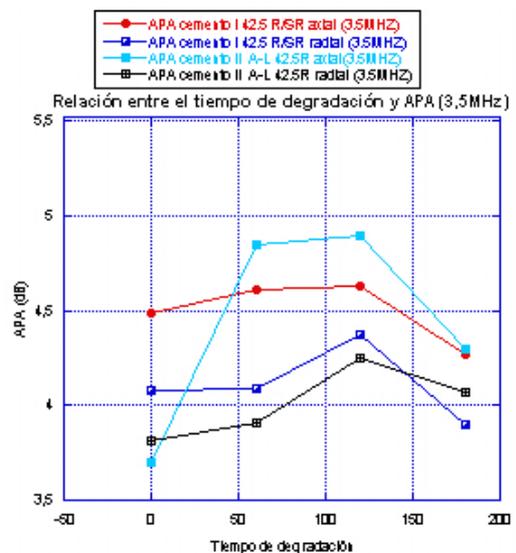


Figura 4. 7. Relación entre el tiempo de degradación y APA (3,5MHz).

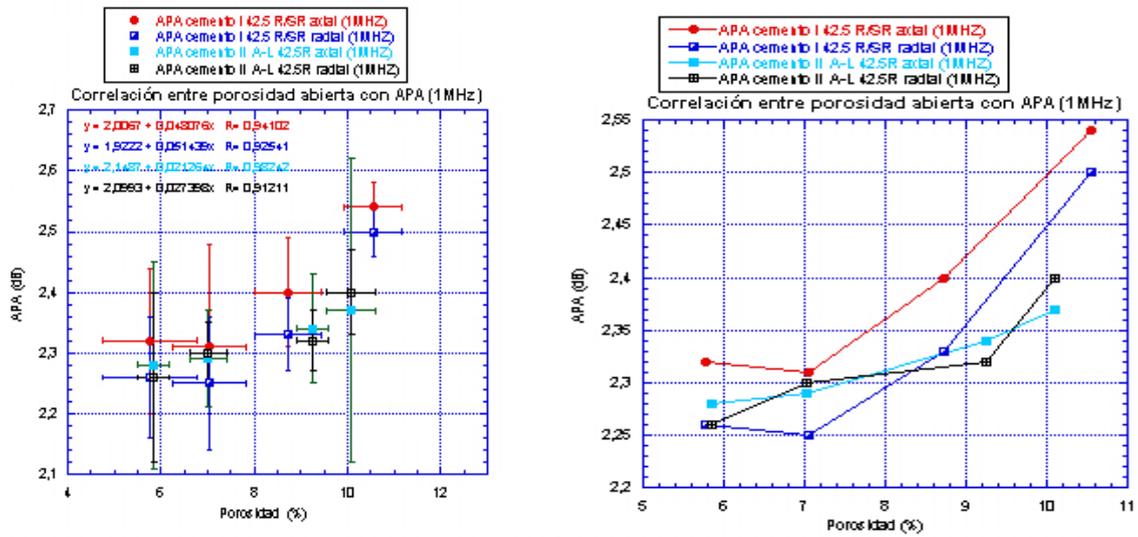


Figura 4. 8. Correlación entre Porosidad y APA (1MHz).

Tipo del cemento	R
I 42,4 R/SR axial	0,94
I 42,4 R/SR radial	0,93
II A-L 42,5R axial	0,98
II A-L 42,5R radial	0,91

Tabla 4. 3. Índice de correlación entre la porosidad abierta con la APA (1MHz).

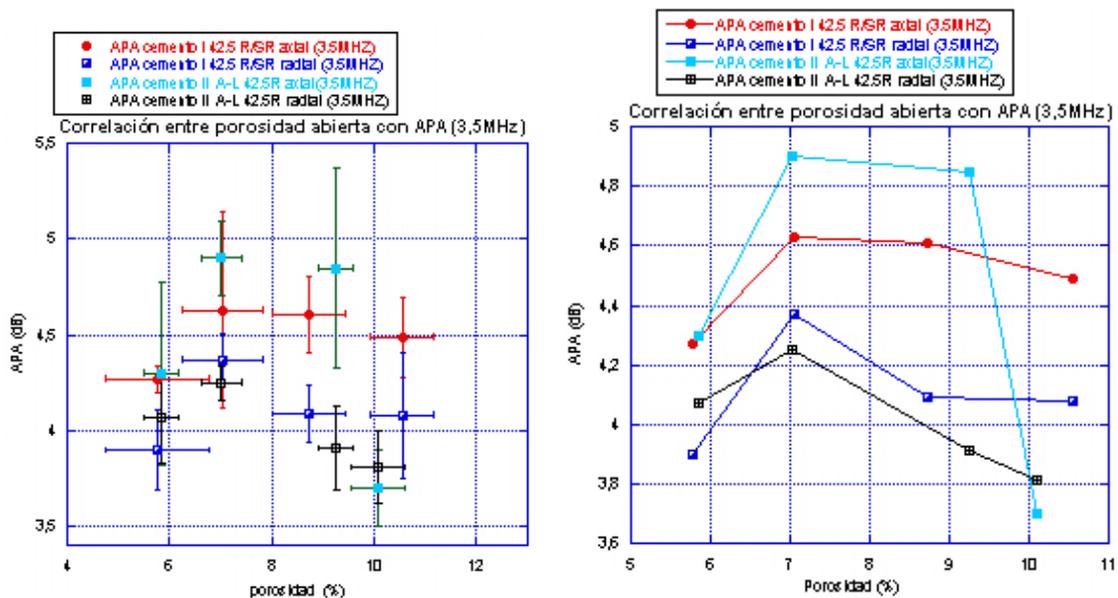


Figura 4. 9. Correlación entre Porosidad y APA (3,5MHz).

A continuación, la Figura 4. 6 y Figura 4. 7, muestran la relación entre la porosidad y la área del perfil de atenuación del ruido estructural (APA) a 1MHz y 3,5 MHz. En primer lugar se observa que hay más atenuación en el caso de las medidas axiales, respecto de las radiales. Este efecto es por la resina Sikaguard colocada en las caras para evitar la propagación de la degradación.

Asimismo, se muestra que la atenuación del ruido granular ultrasónico disminuye con el tiempo hasta 120 días de degradación y se aumenta otra vez a 180 días en el caso de 1 MHz, mientras que para el caso de 3.5 MHz sucede lo contrario, es decir aumenta hasta 180 días que disminuye e invierte la tendencia. Este comportamiento refleja la presencia de algún compuesto cuyo tamaño de partícula sea comparable a la longitud de onda de la frecuencia de excitación o inspección.

Para ello vamos a analizar la interacción onda-microestructura porosa. Así pues, la $\lambda \sim 4.5$ mm para 1MHz mientras que para 3.5 MHz, la $\lambda \sim 1.5$ mm. La interacción suele suceder para partículas dispersores del pulso ultrasónico que presenten un diámetro efectivo entre 10 y 1000 veces inferior a la longitud de onda, con lo que se prevé la aparición de un dispersor (compuesto nuevo) de unos 1.5-450 micras. Si bien para el caso de 1 MHz se tiene mayor interacción con las de gran tamaño y para 3.5 MHz se interacciona más con las de menor tamaño.

En las Figura 4. 8. Se muestra la correlación entre la porosidad y APA (1MHz), en la que se puede observar que la APA en el caso del cemento I 42,5 R/SR disminuye con la porosidad a 120 días de degradación y aumenta otra vez a 180 días (axial y radial), mientras que en el caso del cemento II A-L 42,5R disminuye con la porosidad hasta 180 días (axial y radial).

En las Figura 4. 9. Se muestra la correlación entre la porosidad y APA (3,5MHz), en la que se puede observar que el APA aumenta hasta los 120 días de degradación y disminuye a 180 días mientras que la porosidad abierta al agua sigue bajando para los dos tipos de cemento, mientras que para el caso de porosimetría Hg la porosidad a 180 días de degradación aumenta.

De las Figura 4. 8 y Figura 4. 9, de los resultados de porosimetría de Hg se puede concluir que:

- no hay buena correlación entre los APAs y la porosidad conectada al agua, ya que los APA invierten las tendencias a 180 días, cosa que no se refleja en dicho valor de porosidad,
- sin embargo, se muestra mejor correlación con la porosimetría de Hg. Para el caso de 180 días se muestra un incremento de la porosidad a 180 días y de la contribución del macroporo a la porosidad total, a dicha edad,
- el hecho de que la atenuación APA 1 MHz disminuya a 60 y 120 días respecto del control lo podemos encontrar en el valor la porosidad conectada al agua y conectada de Hg, del mismo modo que el tamaño promedio de poro también disminuye.
- Asimismo, para el caso de APA 3.5 MHz cuya tendencia es aumentar, se puede relacionar con que su interacción con el macroporo es mayor y esta siempre aumenta. Excepto para el caso de 180 días de inmersión donde el macroporo sigue aumentando, pero el parámetro disminuye.

4.3. Porosidad y Ultrasonido transmisión-recepción (onda-P y onda-S)

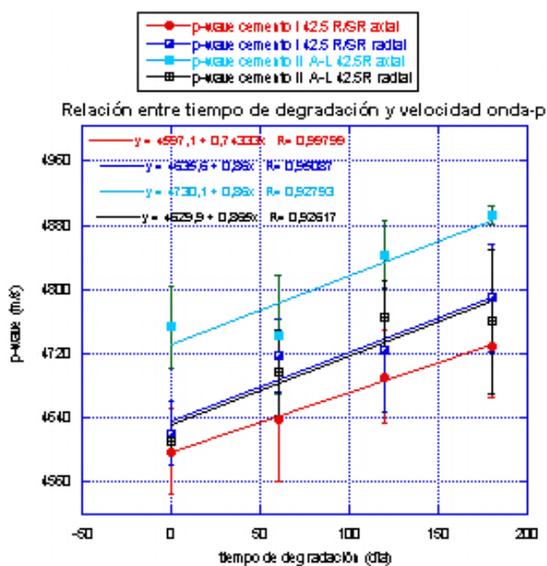


Figura 4. 10. Relación entre el tiempo de degradación y la onda longitudinal (onda-P).

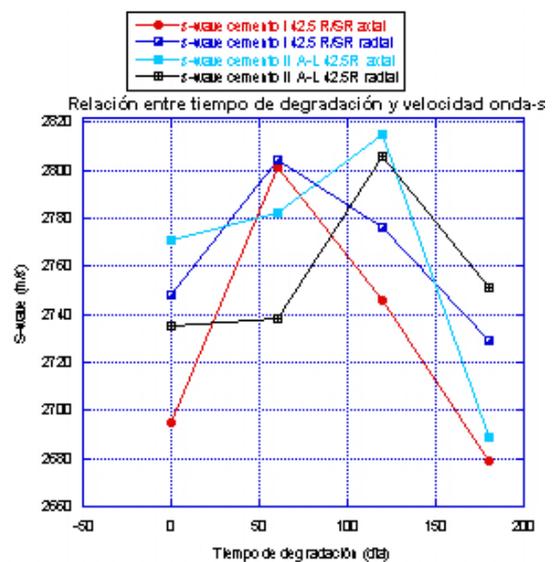


Figura 4. 11. Relación entre el tiempo de degradación y la onda transversal (onda-S).

En la Figura 4. 10, se muestra la relación entre el tiempo de degradación y la onda longitudinal. La velocidad de propagación de la onda P aumenta linealmente con el tiempo, y se puede observar cómo ambos cementos alcanzan velocidades muy

similares (axial y radial). El efecto de la resina sikaguard en este parámetro es menor que en el caso de la atenuación ultrasónica. Esto se debe a que el espesor de resina respecto del total de la propagación es casi despreciable, por eso ni siquiera se corrige en los resultados experimentales. Sin embargo, en la atenuación su efecto es mayor debido a la diferencia en la impedancia ultrasónica y por lo tanto en el incremento de las reflexiones.

La velocidad de propagación se correlaciona con la porosidad, la correlación es mayor en el caso del cemento I 42,4 R/SR que el cemento II A-L 42,5R y en el caso de axial que el radial en los dos cementos (Figura 4. 10 y Tabla 4. 2).

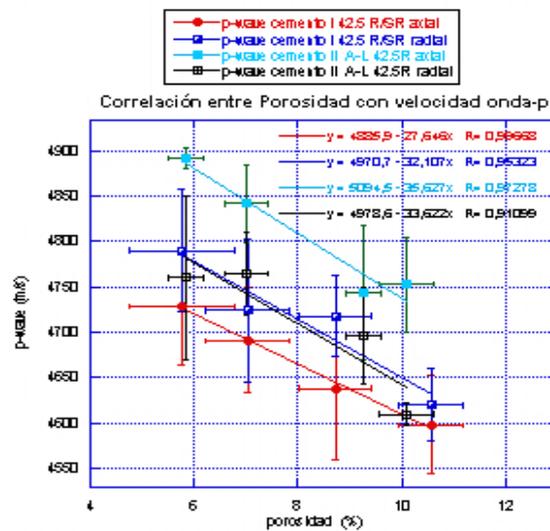


Figura 4. 12. Correlación entre la Porosidad con la onda longitudinal (onda-P).

Tipo del cemento	R
I 42,4 R/SR axial	0,996
I 42,4 R/SR radial	0,953
II A-L 42,5R axial	0,973
II A-L 42,5R radial	0.911

Tabla 4. 4. Índice de correlación entre la Porosidad con la onda longitudinal (onda-P).

En la Figura 4. 11, se muestra la relación entre el tiempo de degradación y la propagación de la onda transversal, en el caso del cemento I 42,5 R/SR aumenta dicha velocidad de la onda hasta 60 días y comienza a disminuir desde 60 hasta 180 días axial y radial, y en el caso del cemento II A-L 42,5 R aumenta la velocidad de la onda S hasta 120 días y disminuye a 180 días, Para el caso de las gráficas que se engloban en la Figura 4. 11, se puede concluir que no hay una correlación del parámetro de la velocidad de propagación de la onda transversal con la porosidad conectada al agua.

Para el caso de su correlación con la porosidad conectada al Hg, si podemos correlacionar su comportamiento (onda S) con la porosidad al Hg en el cemento II, pero el hecho de no tener resultados a 120 días de porosimetría, merece ser prudentes antes de verificar si hay o no una correlación entre el parámetro destructivo y no destructivo.

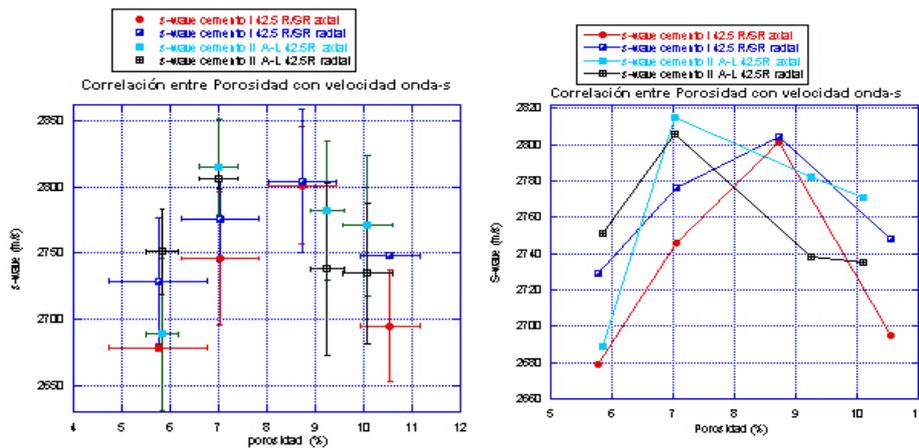


Figura 4. 13. Correlación entre la Porosidad con la onda transversal (onda-S).

4.4. Resistencia a compresión y Ruido granular ultrasonido.

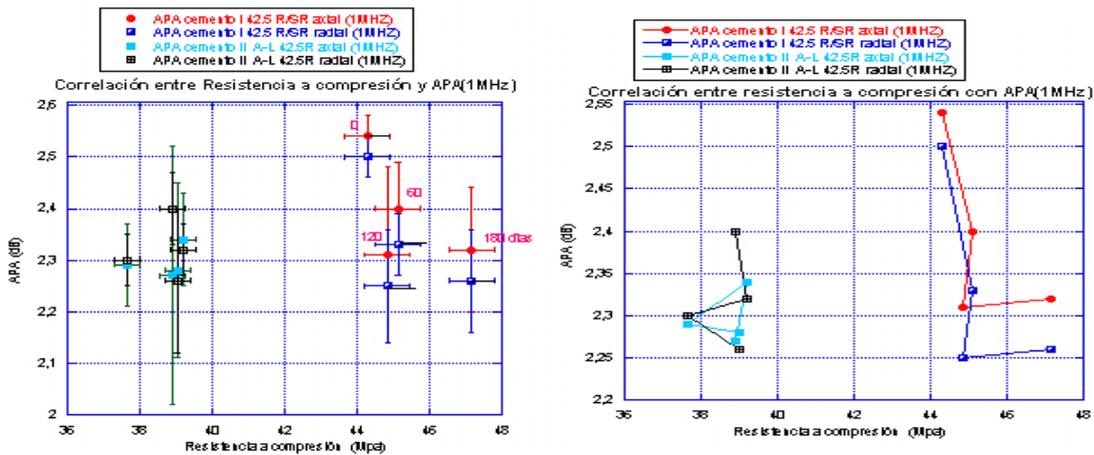


Figura 4. 14. Correlaciones de Resistencia a compresión con los APA del ruido granular en configuración pulso/eco (1MHz).

Para el caso de las gráficas que se engloban en la Figura 4. 14 y Figura 4. 13. Se puede concluir que no hay una correlación del parámetro de atenuación del ruido granular con la resistencia a compresión.

En efecto, la generación de este tipo de señal se produce debida a los efectos de dispersión (backscattering) y no tiene influencia en las propiedades mecánicas de la estructura o microestructura. Sin embargo, si guarda una relación más estrecha con la porosidad. Esta relación se hace cada vez más manifiesta cuando se sintoniza la frecuencia de inspección con los tamaños o conjuntos de los dispersores presente en la estructura porosa de la matriz cementante. Las Figura 4. 16 y Figura 4. 17 muestran que no hay correlación entre la resistencia a compresión con las velocidades medidas con onda-P, ni onda-S. Los estudios anteriores muestran que para microestructuras similares la velocidad de propagación y las resistencias a compresión suelen estar correlacionadas. El hecho de que no exista correlación clara, debido a que la resistencia permanece más o menos constante mientras que las velocidades aumentan es porque se producen fenómenos en el interior de la microestructura que hacen que no se vea afectada la resistencia (o afectada menos de un 5%) y que efectivamente aumenta la velocidad. Esto puede deberse a una disolución de sales en la solución del poro. En principio, los cambios en la distribución de tamaño de poro no afectan a la velocidad de propagación, pues dichas medidas se han realizado con una frecuencia de 500 kHz, que a su vez implica, una longitud de onda muy superior al tamaño de incluso los macroporos.

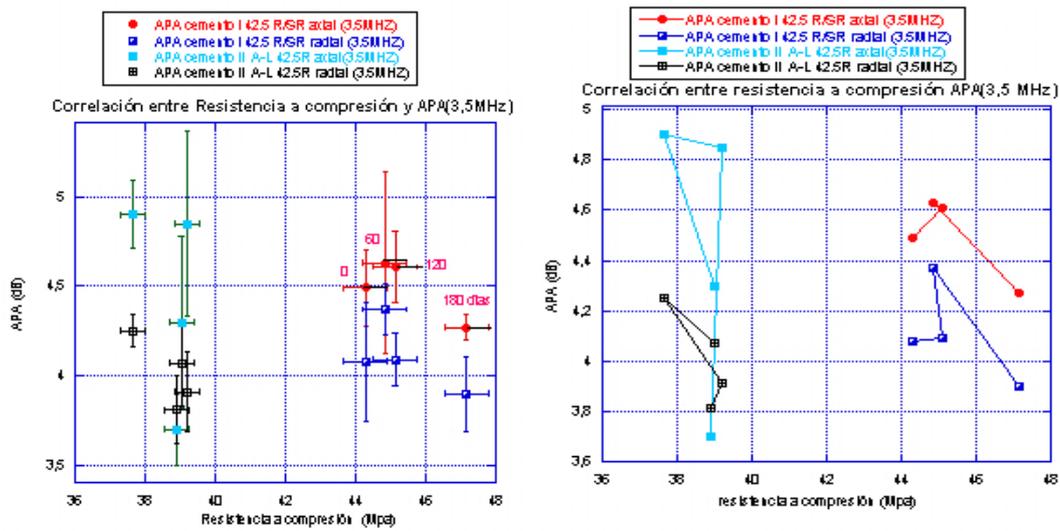


Figura 4. 15. Correlaciones de Resistencia a compresión con los APA del ruido granular en configuración pulso/eco (3,5MHz).

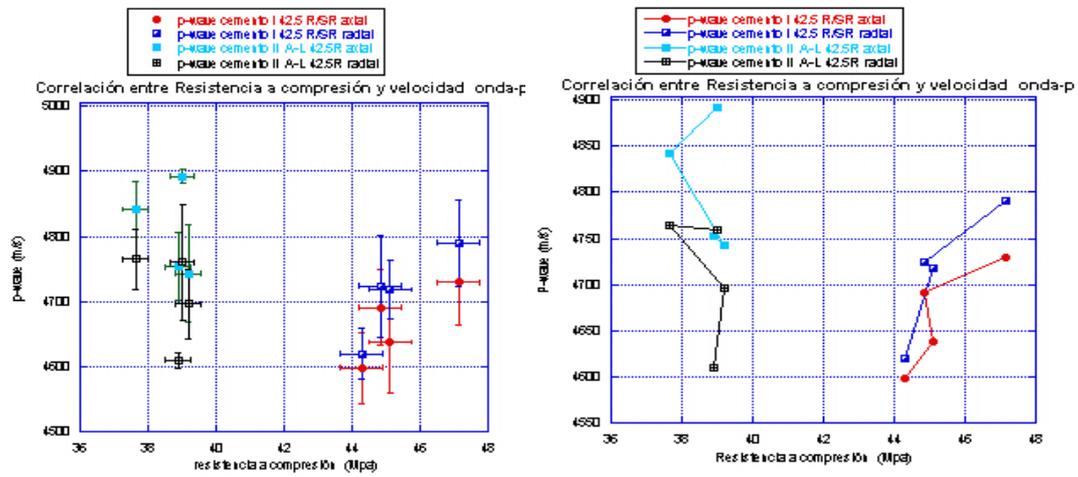


Figura 4. 16. Correlaciones de Resistencia a compresión con la onda longitudinal (onda-P).

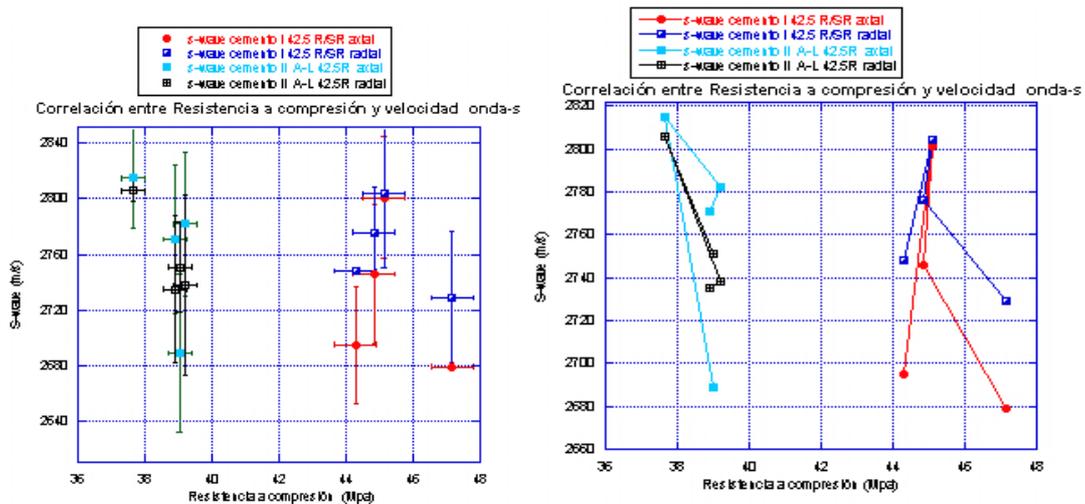


Figura 4. 17. Correlaciones de Resistencia a compresión con la onda (onda-S).

4.5. Velocidad de propagación onda longitudinal (onda-P) y Ultrasonido Ruido granular

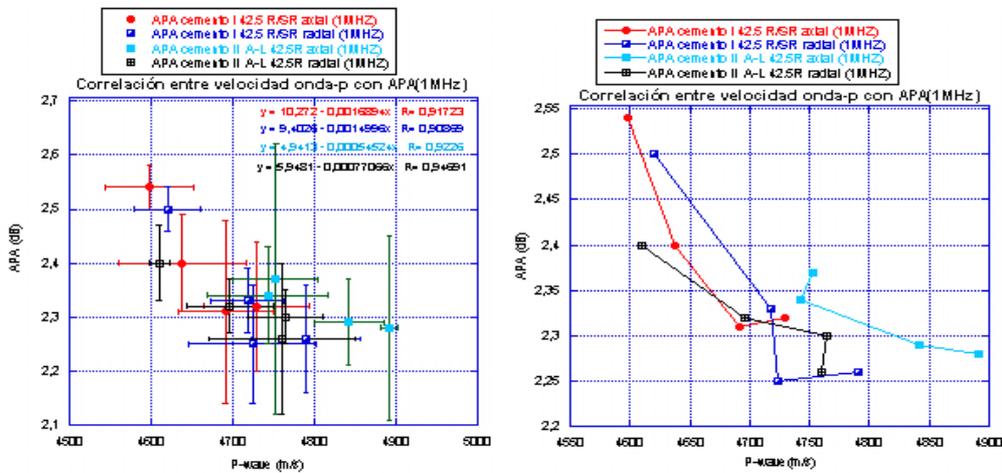


Figura 4. 18. Correlación entre la velocidad de propagación con APA (1MHz).

Tipo del cemento	R
I 42,4 R/SR axial	0,92
I 42,4 R/SR radial	0,91
II A-L 42,5R axial	0,92
II A-L 42,5R radial	0,95

Tabla 4. 5. Índice de correlación entre la onda longitudinal (onda-P) con la APA (1MHz).

En la Figura 4. 18, se muestra la correlación entre la velocidad de propagación de la onda longitudinal con la área del perfil de atenuación (1MHz). En esta ocasión, el APA disminuye con el aumento de la velocidad de la onda hasta 120 días y aumenta a 180 días en el caso del cemento I 42,4 R/SR (axial y radial), mientras en el caso del cemento II A-L 42,5R disminuye hasta los 180 días, este comportamiento es parecido a de la porosidad (Figura 4. 8).

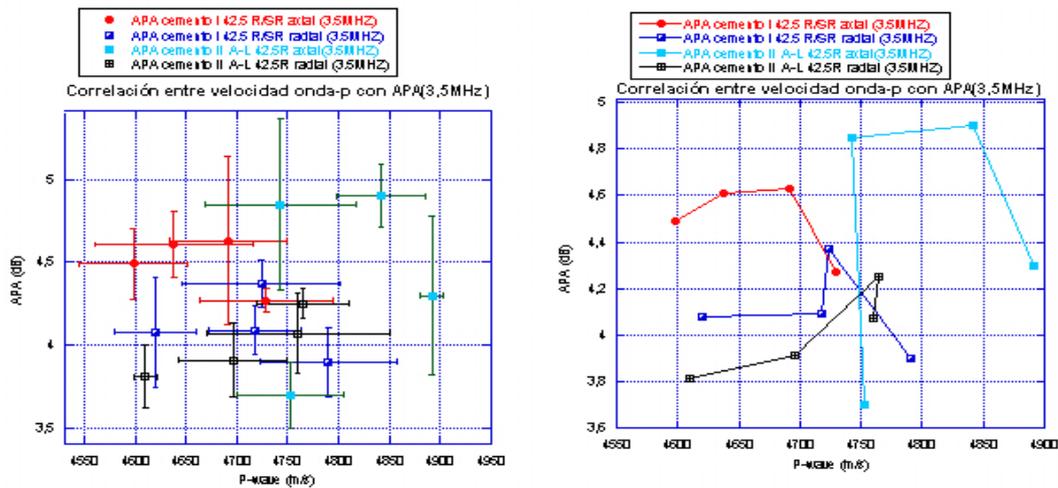


Figura 4. 19. Correlación entre la velocidad de propagación con APA (3,5MHz).

En la Figura 4. 19 se muestra la correlación entre la velocidad de propagación de la onda longitudinal con la área del perfil de atenuación (3,5MHz), En este caso, el APA aumenta con el incremento de la velocidad de la onda hasta 120 días y que invierte la tendencia a 180 días el en caso de los dos cementos (axial y radial), la diferencia en el comportamiento entre APA (1MHz y 3,5 MHz) se explicó en el apartado 4.2.

4.6. Tomografía ultrasónica.

En la Figura 4. 20 se muestran los resultados de las tomografías ultrasónicas en las probetas de ambos cementos a la edad de degradación desde 0 a 180 días.

Se observa que existen zonas con diferente nivel de color (velocidad) que proceden de diferentes zonas con acumulaciones de árido (el árido es una fase con mayor velocidad de propagación), pero en promedio se observan valores parecidos. Lo que implica que según la velocidad de propagación de onda P no hay influencia o degradación efectiva en la matriz de los testigos. Se observa cómo la velocidad es parecida en ambos cementos. Dicho efecto quería obtenerse en la fase de diseño.

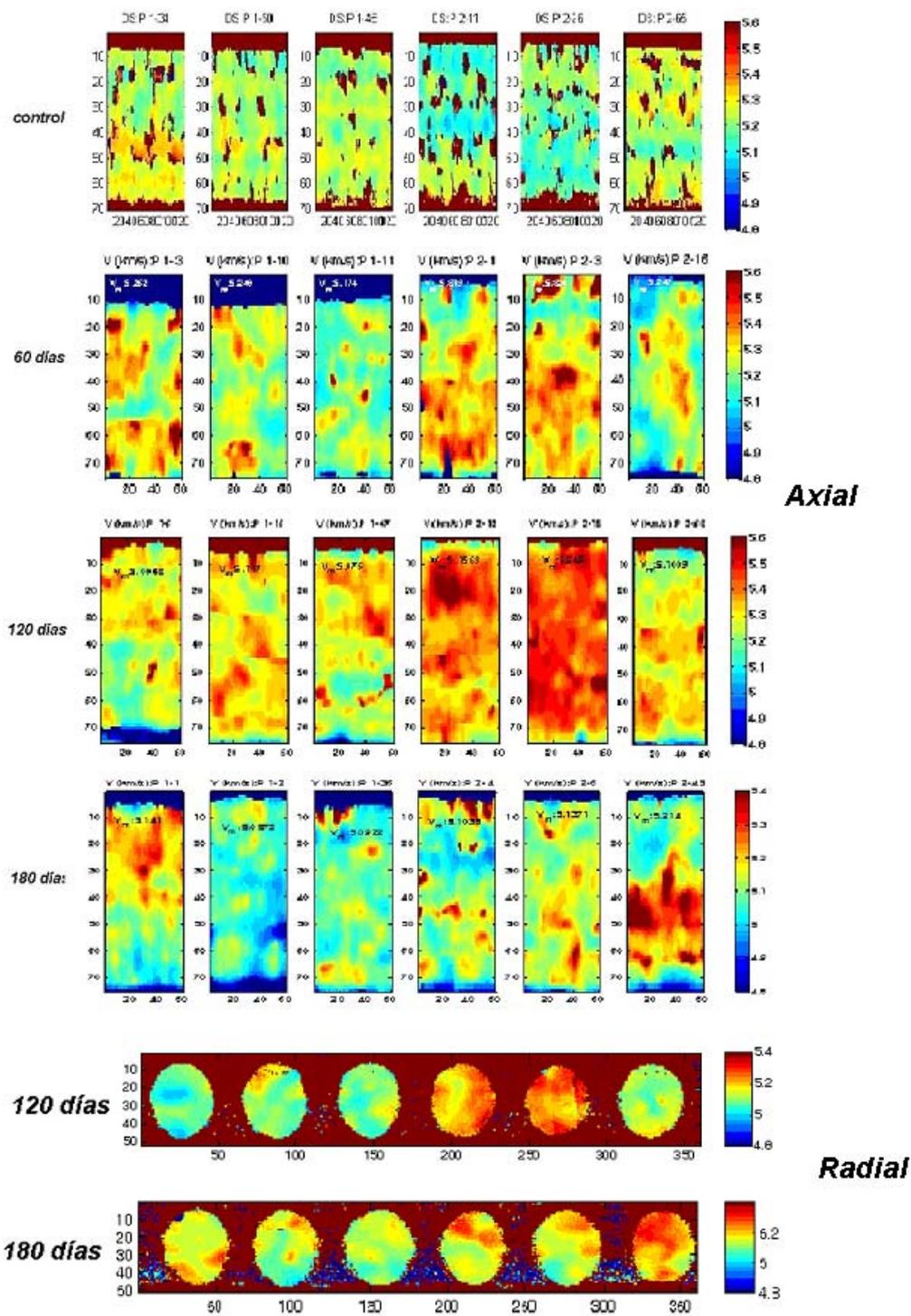


Figura 4. 20. Imágenes de velocidad mediante tomografía ultrasónica

4.7. La microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se presenta el análisis de las muestras del cemento I 42,5R/SR a 60 y 180 días. La fotografía del fragmento analizado y de la zona de análisis concreto que se tomó para establecer el perímetro atacado por agua de mar *sintética* a las diferentes edades de degradación, la Figura 4. 21 muestra una *imagen retrodispersados* de la zona de análisis y la Figura 4. 22 , se muestra la muestra bajo el análisis con la zona analizada

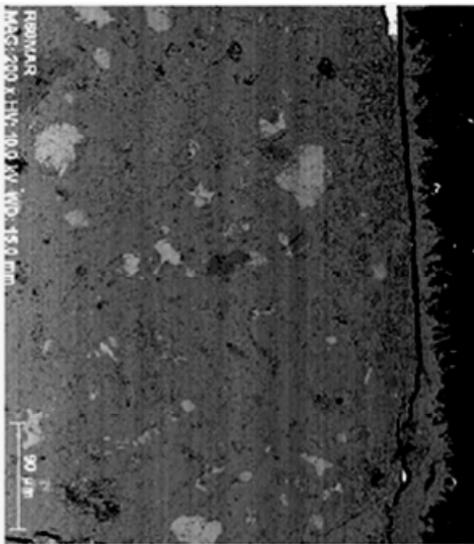


Figura 4. 21. Imagen retrodispersados de la zona de análisis



Figura 4. 22. Zona de análisis en una muestra puesta en resina para el análisis por (SEM).

En la Figura 4. 23, se presentan el mapas de abundancia obtenidos para los elementos Si, Ca, Al y S, para las probetas del cemento I 42,5R/SR a 60 días. La superficie que se observa, en cada una de las fotografías que componen el mapa de los elementos estudiados, representa la misma zona de estudio de la fotografía 4 (zona señalada en la Figura 4. 22, como zona de análisis I) y la abundancia de los elementos está relacionada con la intensidad de color, que se observa en cada una de las imágenes tomadas por SEM.

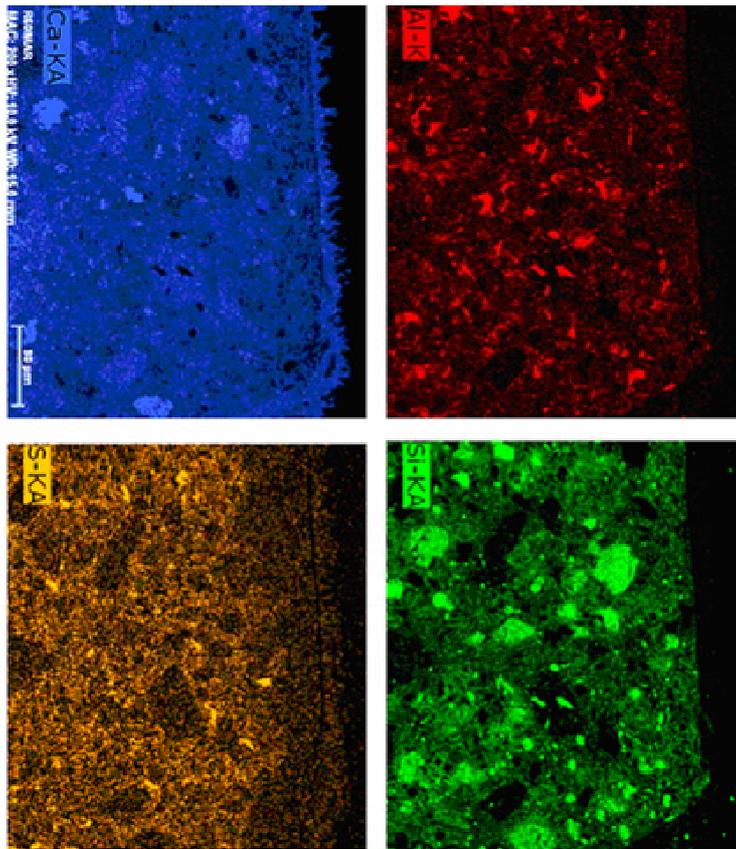


Figura 4. 23. *Análisis EDS, por mapeo elemental de la misma área representada por SEM. (X200).*

Los mapas obtenidos en la Figura 4. 23 son:

Mapa de Aluminio. En la zona representativa del mapa de Aluminio se observan pequeñas zonas aisladas de color más intenso, debidas a los compuestos propios del cemento hidratado. No se observa diferencia entre la zona superior (zona más expuesta al ambiente marino, corresponde con el perímetro de la probeta analizada) y la zona inferior (zona interna del hormigón).

Mapa de Silicio. El mapa de silicio obtenido tampoco presenta diferencias entre al zona externa (zona superior) y la zona interna (zona inferior del mapa) La correspondencia de ciertas formaciones con las que se observan en el mapa de aluminio podría ser debida a la posibilidad de que existan silicatos de tipo feldespático entre los áridos.

Mapa de Calcio. Se observa gran intensidad de emisión para la presencia del elemento Calcio Dado que los áridos del hormigón analizado son de tipo CaCO_3 y/o CaMgCO_3 , además del calcio presente en los compuestos del cemento hidratado. Por otro lado, se aprecia una zona de coloración más intensa (indicativo de mayor abundancia de Calcio en dicha zona) en la zona inferior del mapa, es decir en la zona interna del hormigón (zona no atacada) y una menor intensidad en la zona superior (zona expuesta al ambiente marino correspondería a la interfase) y una zona en la periferia de la probeta que posee una gran cantidad de formaciones de tipo aguja de unas 20 micras de longitud que podrían ser cristales de yeso depositados en la superficie como consecuencia del ataque.

Mapa de Azufre. Se ha seleccionado el mapa de Azufre, por ser un componente esencial del ataque en ambiente marino, Se observa emisión en los cristales de calcio vistos en el mapa anterior corroborando que dichos cristales están formados por Ca y S. No obstante se puede apreciar una interfase que coincide con la zona de interfase observada en el mapa de Calcio y una mayor emisión en la zona Interior indicativo de la penetración del agente agresivo.

A continuación, se presenta el Análisis EDX de una misma área tanto en la zona interna como en la zona externa, para poder discriminar con mayor exactitud la presencia de cada uno de los elementos que intervienen en esta reacción de ataque. Las zonas analizadas poseen la misma área, la zona exterior se encuentra aproximadamente a 40-60 μm de la zona más expuesta del hormigón y la zona interna analizada se encuentra a 300-320 μm desde la zona exterior.

Tal como puede apreciarse en el espectro ambas zonas se diferencian en la abundancia de ciertos elementos el Mg se encuentra en mayor proporción en la zona externa mientras que el Si, el Ca, Al, predominan en la zona interna.

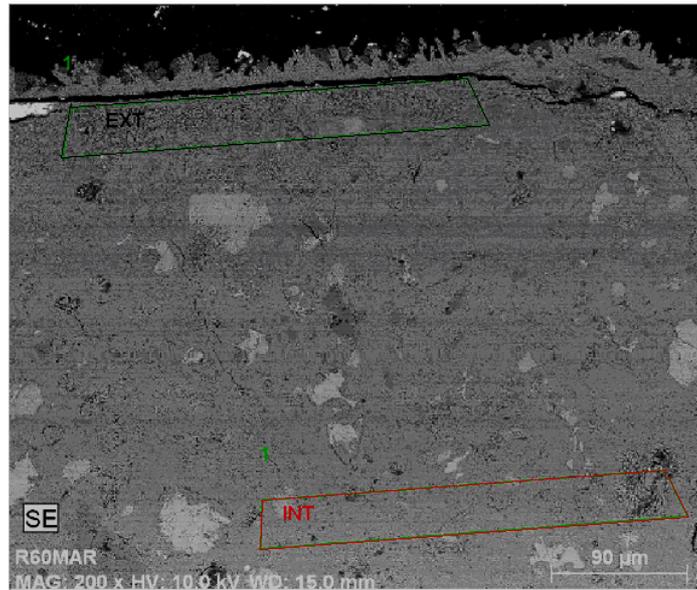


Figura 4. 24. Las zonas analizadas en la muestra (exterior e interior), Zona analizada (x200).

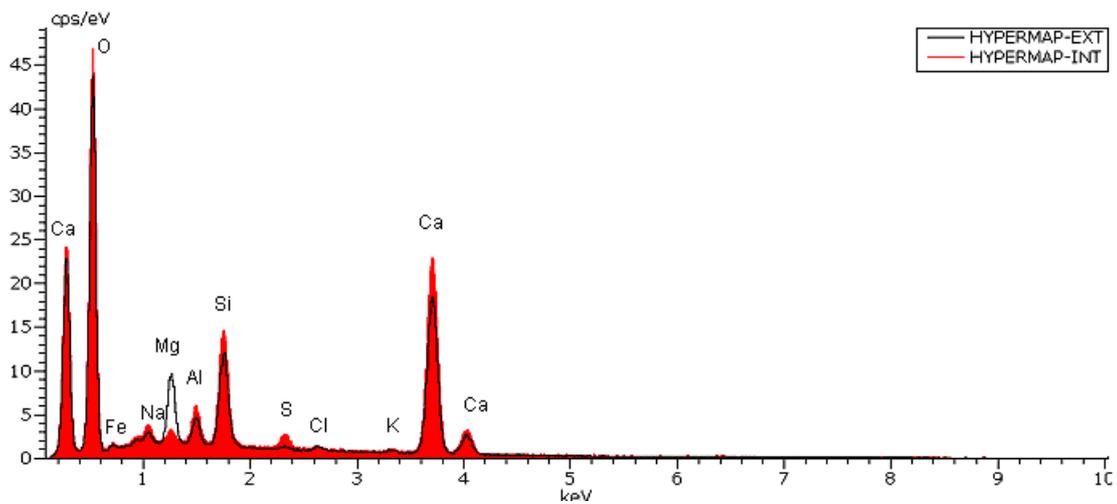


Figura 4. 25. Análisis EDX muestra recubierta con Carbono, en ambas zonas

A continuación, los resultados obtenidos tras 180 días de agresión en medio marino para este mismo tipo de hormigón.

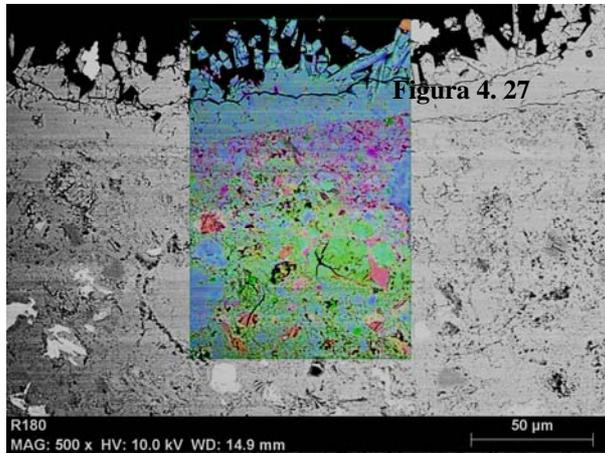


Figura 4. 27

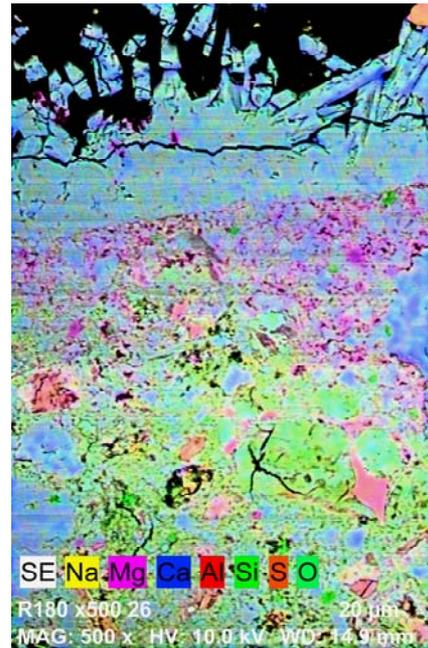


Figura 4. 26. Imagen SEM (x500) y mapeo compuesto de la muestra de hormigón tras 180 días en ambiente marino.

Viendo la fotografía anterior se puede también evidenciar una zona situada más cercana al perímetro de la probeta en la que predominan los cristales de yeso que se observaban ya a 60 días, seguidamente se puede apreciar una zona en la que se observa a simple vista la presencia de Magnesio entre otros elementos, para poder establecer la presencia o no de cada uno de los elementos se presenta a continuación la misma imagen con el mapeo de cada uno de los elementos.

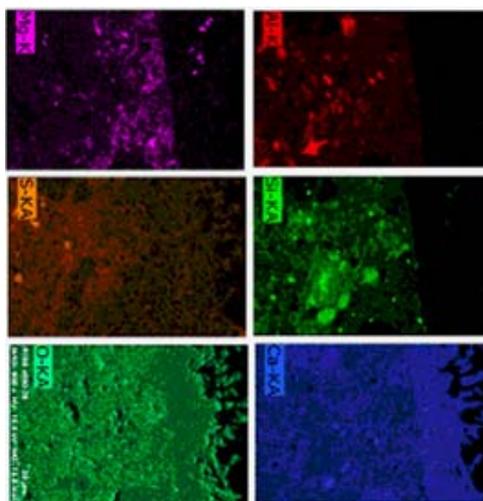


Figura 4. 28. Mapeo de la zona superior (x500)

A la luz de los resultados obtenidos resulta muy complicado establecer una profundidad de ataque global a cada una de las edades, el hecho de analizar un ataque en ambiente marino lleva implícita la presencia de un gran número de agentes involucrados y por tanto la accesibilidad de estos al interior del hormigón va a depender de la porosidad del hormigón, del tamaño de los iones involucrados en el ataque y de los compuestos que se formen como consecuencia del mismo.

En el análisis presentado se ha podido corroborar la presencia de yeso en la zona perimetral del testigo de hormigón y también formaciones de brucita, pero se ha realizado un registro de zonas más internas del hormigón y no se ha podido descartar que se encuentren libres de ataque pues se han hallado trazas de Cloro, Magnesio, Azufre propios del ataque marino, por tanto resulta muy complicado establecer un perfil de penetración de agua de mar.

5. Conclusiones

A partir de las correlaciones entre los parámetros con sus mismos, se puede concluir que:

Hay una buena correlación entre la porosidad abierta con la velocidad de propagación de la onda longitudinal y el Área del Perfil de atenuaciones en el dominio tiempo-frecuencia (APA) para las frecuencias de inspección 1 y 3,5MHz, en el caso de la APA (1MHz) se muestra mejor correlación en el caso del cemento I 42,5 R/SR que el cemento II A-L 42,5R y que es mejor en el caso de medidas axiales que en las radiales para los dos cementos bajo estudio.

El APA (3,5MHz) tiene un comportamiento contrario a la de APA (1MHz), y se correlaciona con la velocidad de la onda-P y la porosidad pero no muestra ningún diferencia entre los dos cementos (axial y radial). La explicación puede radicar en que la distribución de tamaño de poro también varía. Así pues, la porosidad y el tamaño medio de poro disminuye, relacionándose más con las reflexiones del pulso de 1 MHz (APA 1MHz), mientras que el macroporo aumenta y este hecho afecta más a 3.5 MHz que a su vez aumenta con la edad de degradación. Este hecho no sucede a 180 días, donde se rompe la tendencia y donde hay que buscar otros razonamientos para explicar los resultados experimentales.

No hay una correlación del parámetro de atenuación del ruido granular con la resistencia a compresión. En efecto, la generación de este tipo de señal se produce debida a los efectos de dispersión (backscattering) y no tiene influencia en las propiedades mecánicas de la estructura o microestructura.

6. Trabajo futuro

Para lograr el objetivo del presente trabajo teníamos dos planos de trabajo,

Plan A, que esta realizando:

- **Degradación por agua de mar:** se presentó una parte de sus resultados en este trabajo, se seguirá la deterioración hasta tiempo 360 días aplicando todas las técnicas que está demostradas anteriormente.
- **Degradación por cloruro de sodio :** la deterioración por cloruro de sodio esta realizando desde más de 90 días hasta 360 días (168 testigos)

El plan B,

- **Degradación por cloruro de amonio.**
- **Degradación por sulfato de amonio.**

Se fabricarán dos marcos nuevos con las mismas dosificaciones de los marcos bajo el estudio, se sacarán 168 testigos para cada ambiente de degradación y se aplicarán las mismas técnicas en el mismo periodo (360 días).

Se correlacionarán los resultados de las técnicas aplicadas entre unos y otros para cada ambiente agresivo.

7. BIBLIOGRAFÍA

Méndez M. E (2007). *“Procesos expansivos del hormigón: Enayos árido-álcali, ataque por sulfatos y ataque por hielo-deshielo.”* Sistemas de prevención y actuaciones, Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Madrid, España: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja- CSIC.

Bermúdez M. A., Alaejos, P., Lazana, V (2007). *“La corrosión del hormigón armado en ambiente marino: contenido citico de cloruros.”* Madrid: Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX).

Bermúdez M.Á., Alaejos, P (2007). *“Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido.”* Ingeniería de construcción. Vol. 22, 15-22.

EHE (2000). *“Instrucción de Hormigón estructural.”* Madrid, España: Ministerio de Fomento.

Canovas M., F (2004). *Hormigón.* Madrid, España: Colegio de los ingenieros de caminos.

Shazali M.A., Baluch M.H. ,Al-Gadhib A.H (2006). *“Predicting residual strength in unsaturated concrete exposed to sulfate attack.”* Materials in Civil Engineering. Vol. 18, 343-354.

Vu D.D., Stroeven P., Bui V.B (2001). *“Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete.”* [Publicación periódica] // Cement and Concrete Composites. Vol. 23, 471-478.

Mehta P.K (2003). *“Concrete in the Marine Environment.”* London: Taylor & Francis.

Gaal G.C.M (2004). *“Prediction of Deterioration of Concrete of Bridges: Corrosion of Reinforcement due to Chloride Ingress and Carbonation.”* Press Delft University, Netherlands : DUP Science.

Experts Concrete International, www.concrete-experts.com. 21 de 08 de 2006.

ACI_201 (2001). *“La Durabilidad del Hormigón.”* Informado por el Comité ACI 201-USA: American Concrete Institute.

Segarra J. F (2005). *“Treballs acadèmics UPC. Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón.”,* [https://upcommons.upc.edu.
http://hdl.handle.net/2099.1/3315](https://upcommons.upc.edu/http://hdl.handle.net/2099.1/3315).

Smith, E.H., *Mechanical Engineers Reference Book.* 12th ed . 1998: Butterworth Heinemann. 1248.

M. Chekroun, L. Le Marrec, O. Abraham, O. Durand, G. Villain (2009). *“Analysis of coherent surface wave dispersion and attenuation for non-destructive testing of concrete.”* Ultrasonics xxx, xxx-xxx.

V.M. Malhotra, N.J. Carino (1991). *“Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.”* CRC Press LLC.

M.F. Kaplan (1959), *“The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete.”* Mag. Concr. Res. 11 (32) (85).

F.P. Zhou, F.D. Lydon, B.I.G. Barr (1995). *“Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete.”* Cem. Concr. Res. 25(1) 177–186.

Naik, T. R (1979). *“Ultrasonic Testing to Determine Concrete Properties.”* Engineering Methods in Concrete Structures for Practitioners, American Concrete Institute, ASCE.

Manning, D. G (1985). *“Detecting Defects and Deterioration in Highway Structures.”* NCHRP Synthesis of Highway Practice: 118, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.

Moore, W. M (1973). *“Detection of Bridge Deterioration.”* Highway Research Record No. 451, Highway Research Board, National Research Council, Washington.

Knab, L Y., Blessing, G. V. and Clifton, J. R (1983). *“Laboratory Evaluation of Ultrasonics for Crack Detection in Concrete.”* Proceedings of the American Concrete Institute. 80, 1.

Woodward, R. J (1984). *“Inspecting Concrete Bridges.”* The Physics Bulletin, Institute of Physics, Bristol, England, 35, 4.

Carino, N. J., Sansalone, M., and Hsu, N. M (1986). *“A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete.”* Proceedings of the American Concrete Institute. 83, 2.

Mouenow R. A, and Abrams M. S, (1986). *“Nondestructive Testing Methods for Evaluating Damage and Repair of Concrete Exposed to Fire.”* American Concrete Institute. SP-92.

Jones, R (1962). *“Non-Destructive Testing of Concrete.”* Cambridge University Press, London.

Bullock R.E, and Whitehurst E.A (1959). *“Effect of certain variables on pulse velocities through concrete.”* Highway Res. Board Bull., 206, 37.

Sturup V.R, Vecchio R.J, and Caratin H, (1984). *“Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength.”* ACI SP 82-11, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 201.

Swamy N.R, and Al-Hamed, A.H (1984). *“The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete.”* Malhotra, V.M., Ed., ACI SP 82, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 247.

Anderson, D.A. and Seals, R.K (1981). *“Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 day strength.”* ACI J., 78,116,

Jones, R., (1954). *“Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique.”* RILEM Int. Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Paris, Vol. 1, Paper No. A-17 , 137. RILEM Bull., 19(Part 2).

Popovics S., Rose J.L., and Popovics J.S., (1990). *"The behavior of ultrasonic pulses in concrete."* Cem. Concr. Res., 20, 259.

Kaplan, M.F.,(1959). *"The effects of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete."* Mag. Concr. Res., 11(32), 85.

Pascale, G., Di Leo, A., and Bonora, V. (2003). *"Nondestructive assessment of the actual compressive strength of high-strength concrete."* Journal of Materials in Civil Engineering, 15(5), 452-459.

Anderson, D. A., and Seals, R. K. (1981). *"Pulse Velocity as a Predictor of 28- and 90-Day Strength."* Journal of The American Concrete Institute, 78(2), 116-122.

Toutanji, H. (2000). *"Ultrasonic wave velocity signal interpretation of simulated concrete bridge decks."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 33(227), 207-215.

Jung, Y. C., Kundu, T., and Ehsani, M. R. (2002). *"A new nondestructive inspection technique for reinforced concrete beams."* ACI Materials Journal, 99(3), 292-299.

Voigt, T., Akkaya, Y., and Shah, S. P. (2003). *"Determination of early age mortar and concrete strength by ultrasonic wave reflections."* Journal of Materials in Civil Engineering, 15(3), 247-254.

Akkaya, Y., Voigt, T., Subramaniam, K. V., and Shah, S. P. (2003). *"Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 36(262), 507-514.

Voigt, T., Akkaya, Y., and Shah, S. P. (2003). *"Determination of early age mortar and concrete strength by ultrasonic wave reflections."* Journal of Materials in Civil Engineering, 15(3), 247-254.

M.G. Hernaández , M.A.G. Izquierdo, A. Ibáñez, J.J. Anaya, L.G. Ullate (2000). *"Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE."* Ultrasonics 38, P 531-533.

Zoubeir. Lafhaj, Marc. Goueygou (2009). *"Experimental study on sound and damaged mortar: Variation of ultrasonic parameters with porosity."* Construction and Building Materials 23,P 953-958.

Wonsiri Punurai , Jacek Jarzynski , Jianmin Qu , Jin-Yeon Kim , Laurence J. Jacobs , Kimberly E. Kurtis , (2007) .*"Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques."* Cement and Concrete Research 37, P 38-46.

D. Aggelis, (2005). *"Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results."* Journal of Mechanical and Physics of Solids, 53. 857-883.

Th. Voigt, (2005). *"Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete."* Materials and Structures 38 (October 729-738).

G. Trtnik, (2009). “ *Comparison between two ultrasonic methods in their ability to monitor the setting process of cement pastes.*” Cement and Concrete Research 39 876–882.

S. Ould Naffa, (2002). “*Detection of chemical damage in concrete using ultrasound.*” Ultrasonics 40, 247–251.

Saniie J., Wang T., Bilgutay N.M., (1988). “*Statistical evaluation backscattered ultrasonic grain signals.*” J. Acoust. Soc. Am. 84 (1), p.400-408.

J. H. Rose et al., (1992). “*Ultrasonic backscatter from microstructure.*” Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 11B, pp. 1677-1684.

J. T. Turner et al., (1999). “*Elastic wave propagation and scattering in heterogeneous, anisotropic media: Textured polycrystalline materials.*” J. Acoust. Soc. Am., 106, 541-552.

Z. Q. Liu, et al., (1994). “*Signal enhancement of ultrasonic testing for coarse grained materials and its pattern recognition.*” Ph.D. Thesis, Tongji University, Shanghai, China.

Fuente J.V. et al.,(2005). “*Medida de porosidad en hormigón mediante extracción de firmas a partir de ruido granular ultrasónico.*” Póster, Congreso de Materiales, Valencia.

W.J.Mccarter, et al., (1999). “*Immittance spectra for Portland cement/fly ash-based binders during early hydration.*” Cement and concrete research 29, p. 377-387.

Beaudoin. J., “A.C., (1994). “*impedance phenomena in hydrating cement systems: Detectability of the high frequency arc.*” Cem. Concr. Res. 24, p. 92-94.

Macphee. D.E., (2000). “*AC impedance spectroscopy of pore reduced cements: Influence of contact resistance.*” Journal of Materials Science, Volume 35, Number 19,p. 4823-4826(4).

Coverdale, R. T., (1995). “*Electrode Configurations and Impedance Spectra of Cement Pastes.*” Journal of Materials Science, Vol. 30, 1217-1224.

M. Cabeza, et al., (2002). “*Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste.*” Cement and Concrete Research, Vol. 32, 881-891.

Archie, G.E., (1942). “*The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.*” Petroleum Transaction of the AIME 146 54-62.

Acebes, M., (2008). “*Caracterización de la durabilidad del hormigón sometido a ciclos hielo deshielo mediante modelos micromecánicos.*” Anales de la mecánica de fractura. Ed. Secretaria GEF, I.S.S.N: 0213-3725, 587-592.

Francisco J. C. V., Jaime H. R., Miguel A. A. E., (1999). “*Estudios de corrosión en puentes de concreto pre-esfuerzo, Cables de pre-esfuerzo.*” Publicación Técnica No. 122, ISSN 0188-7297, Sanfandila, Qro.

Noma UNE 83-304-84.- Ensayos de hormigón. Rotura por compresión.

Norma UNE 83-303-84.- Ensayos de hormigón. Refrentado de probetas con mortero de azufre.

Norma UNE 83-302-84.- Ensayos de hormigón. Extracción y conservación de probetas testigo.

Norma UNE 83-134-90.- Áridos para hormigones. Determinación de las densidades, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso.

UNE-80303-1.- Cementos con características adicionales: Cementos resistentes a los sulfatos. Madrid-España : AENOR, 2001.