



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# **ESTUDIO SOBRE CINCO TIPOS DE HORMIGONES CON PROPIEDADES ESPECIALES**

Trabajo realizado por:  
***Julen González Lara***

Dirigido:  
***Francisco Ballester Muñoz***  
***Jokin Rico Arenal***

Titulación:  
**Máster Universitario en  
Ingeniería de Caminos, Canales y  
Puertos**

Santander, febrero de 2018

**TRABAJO FINAL DE MASTER**



# ESTUDIO SOBRE CINCO TIPOS DE HORMIGONES CON PROPIEDADES ESPECIALES

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA  
ETS DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS  
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Autor:

JULEN GONZÁLEZ LARA

Directores:

Dr. FRANCISCO BALLESTER MUÑOZ

Dr. JOKIN RICO ARENAL

Fecha:

FEBRERO 2018

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**



*A mi familia*



# Study on five types of concrete with special properties

## Author

GONZÁLEZ LARA, JULEN

## Directors

BALLESTER MUÑOZ, FRANCISCO

RICO ARENAL, JOKIN

Call – February 2018

**Keywords**– Concrete, aggregates, special, strength, compression, durability, radiological, heavyweight, translucent, lightweight, self-healing, bacteria, conductor, carbon, resistivity, conductivity, EMI.

**Abstract** – Concrete is an omnipresent material in constructions of all kinds, either as main or auxiliary material, and its use goes back to ancient civilizations such as the Roman Empire and even earlier according to some authors. This has been motivated, among other reasons, to some of the qualities of this material such as its great resistance to compression stress and low production cost. However, concrete also has some characteristics that are not as favorable as its low resistance to tension and high own weight, that is to say, until now it has the characteristics of a stone material.

On the other hand, concrete, unlike stone, is not extracted from a quarry, but is designed and allows choosing its components and quantities according to desired final characteristics. This is where the object of study of this work comes in, a study on five types of special concretes that are not designed solely with the criterion of obtaining the greatest resistance, but that seek other properties such as protection against radioactivity, translucency, lightness, capacity for self-repair and thermal, and electrical conductivity.

The present work is a bibliographic review of the existing concretes with the five properties mentioned above, as well as their degree of development so far. It is intended to give a global view of these five types of concretes mentioned and highlight some of its particularities following a common structure that guides the reader in its reading. In this way, each chapter consists of an introduction, types of concrete that can be found with the quality of the chapter in question, typical dosages of said concrete, its physical-mechanical characteristics, some of its applications and finally conclusions to the chapter.



# Estudio sobre cinco tipos de hormigones con propiedades especiales

**Autor**

GONZÁLEZ LARA, JULEN

**Directores**

BALLESTER MUÑOZ, FRANCISCO

RICO ARENAL, JOKIN

**Convocatoria** – Febrero 2018

**Palabras clave** – Hormigón, áridos, especial, resistencia, compresión, durabilidad, radiológico, pesado, translúcido, ligero, autorreparable, bacteria, conductor, carbono, resistividad, conductividad, EMI.

**Resumen** – El hormigón es un material omnipresente en construcciones de todo tipo, ya sea como material principal o auxiliar, y su utilización se remonta a civilizaciones antiguas como el Imperio Romano e incluso anteriores según algunos autores. Esto ha sido motivado, entre otras razones, a algunas de las cualidades de este material como son su gran resistencia a esfuerzos de compresión y bajo coste de producción. Sin embargo, el hormigón también tiene algunas características no tan favorables como son su escasa resistencia a la tracción y elevado peso propio, es decir, hasta ahora se tienen las características propias de un material pétreo.

Por otro lado, el hormigón a diferencia de la piedra, no se extrae de una cantera, sino que se diseña y permite elegir sus componentes y cantidades de acuerdo a unas características finales deseadas. Es aquí donde entra el objeto de estudio de este trabajo, un estudio sobre cinco tipos de hormigones especiales que no se diseñan únicamente con el criterio de obtener la mayor resistencia, sino que se buscan otras propiedades como: protección frente a la radioactividad, translucidez, ligereza, capacidad de autorreparación y conductividad térmica y eléctrica.

El presente trabajo es una revisión bibliográfica de los hormigones existentes con las cinco propiedades mencionadas anteriormente, así como su grado de desarrollo hasta el momento. Se pretende dar una visión global de estos cinco tipos de hormigones mencionados, así como destacar algunas de sus particularidades siguiendo una estructura común que guíe al lector en su lectura. De esta forma, cada capítulo consta de una introducción, tipos de hormigones que se pueden encontrar con la cualidad del capítulo en cuestión, dosificaciones típicas de dicho hormigón, sus características físico-mecánicas, algunas de sus aplicaciones y finalmente conclusiones al capítulo.



## *Índice general*

<b>Capítulo 1. Hormigón para protección radiológica .....</b>	<b>13</b>
1.1 Introducción, definiciones y limitaciones .....	13
1.1.1 Breve introducción a la radiactividad.....	13
1.1.2 Protección frente a la radiación .....	15
1.2 Tipos de hormigones para protección radiológica .....	19
1.2.1 Tipos de áridos .....	19
1.2.2 Hormigones con áridos de uranio empobrecido .....	22
1.3 Dosificación .....	30
1.3.1 Cemento .....	32
1.3.2 Agua.....	33
1.4 Características físico-mecánicas .....	33
1.4.1 Durabilidad .....	36
1.5 Aplicaciones .....	37
1.6 Conclusiones .....	39
<b>Capítulo 2. Hormigón translúcido .....</b>	<b>41</b>
2.1 Introducción, definiciones y limitaciones.....	41
2.2 Hormigón translúcido con fibra óptica .....	42
2.2.1 Composición .....	43
2.2.2 Características físico-mecánicas .....	44
2.2.3 Aplicaciones.....	48
2.2.4 Conclusiones.....	49
2.3 Hormigón translúcido fotocatalítico.....	50
2.3.1 Fotocatálisis .....	50
2.3.2 Reacción álcali-sílice .....	52
2.3.3 Características físico-mecánicas .....	55
2.3.4 Conclusiones.....	57
<b>Capítulo 3. Hormigón ligero.....</b>	<b>59</b>
3.1 Introducción, definiciones y limitaciones.....	59

3.1.1	Introducción.....	59
3.1.2	Definiciones .....	60
3.2	Tipos de hormigones.....	61
3.2.1	Hormigón celular.....	62
3.2.2	Hormigón con árido ligero.....	63
3.3	Dosificación.....	69
3.4	Características físico-mecánicas .....	74
3.4.1	Introducción.....	74
3.4.2	Resistencia a compresión.....	75
3.4.3	Módulo de elasticidad .....	77
3.4.4	Retracción y fluencia.....	79
3.4.5	Conductividad térmica .....	81
3.4.6	Durabilidad .....	81
3.5	Aplicaciones .....	83
3.6	Conclusiones .....	85
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Hormigón autorreparable.....</b>	<b>87</b>
4.1	Introducción .....	87
4.1.1	Reparación autógena.....	89
4.1.2	Condiciones para la autorreparación .....	90
4.2	Tipos de hormigones autorreparables .....	90
4.2.1	Fibras huecas .....	90
4.2.2	Microencapsulación.....	91
4.2.3	Biom mineralización.....	94
4.3	Dosificación.....	98
4.4	Características físico mecánicas .....	100
4.5	Aplicaciones .....	103
4.6	Conclusiones .....	106
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Hormigón conductor .....</b>	<b>107</b>
5.1	Introducción, definición y limitaciones.....	107
5.1.1	Funciones del hormigón conductor .....	108
5.1.2	Límite de percolación.....	109
5.1.3	Medida de la resistividad .....	110

5.2 Tipos de adiciones conductoras .....	111
5.2.1 Fibras de carbono (FC).....	111
5.2.2 Nanofibras de carbono (CNF).....	113
5.2.3 Nanotubos de carbono (CNT) .....	115
5.3 Dosificación .....	117
5.3.1 Métodos de dispersión de filamentos de carbono.....	119
5.4 Propiedades físico mecánicas .....	120
5.4.1 Resistencia a compresión y resistividad.....	120
5.4.2 Apantallamiento de interferencias electromagnéticas (EMI).....	123
5.4.3 Durabilidad .....	125
5.5 Aplicaciones .....	128
5.5.1 Función de percepción de la deformación.....	128
5.5.2 Monitorización del tráfico en movimiento .....	129
5.5.3 Medida de la temperatura .....	130
5.5.4 Pavimento calefactor para deshielo.....	131
5.5.5 Protección electromagnética.....	133
5.6 Conclusión .....	136
<b>Capítulo 6. Bibliografía .....</b>	<b>138</b>



# Capítulo 1. Hormigón para protección radiológica

## 1.1 Introducción, definiciones y limitaciones

### 1.1.1 Breve introducción a la radiactividad

La radiactividad fue descubierta por el científico francés Antoine Henri Becquerel (quien estudió en la École des Ponts et Chaussées) en 1896 al tratar de observar la emisión de rayos X en el sulfato doble de uranio y potasio (sal de uranio) expuesto a la luz solar. Descubrió que el uranio emitía espontáneamente una radiación misteriosa. Esta propiedad del uranio (después se vería que hay otros elementos que la poseen) para emitir radiaciones sin ser excitado previamente, recibió posteriormente el nombre de radiactividad [1] de la mano del matrimonio Curie en 1898.

Antes de adentrarse más en la radiactividad, conviene retroceder hasta la definición de radiación, de la cual la radiactividad es un tipo. La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas. Una onda electromagnética es una forma de transportar energía, por ejemplo, el calor que transmite la luz del sol. Las ondas o radiaciones electromagnéticas se pueden clasificar en (ver Figura 1.1 [2]):

- Radiación no ionizante: no tienen la suficiente energía como para romper los enlaces que unen los átomos del medio que irradian como, por ejemplo, ondas de radio y TV, microondas, luz visible, luz ultravioleta, infrarrojos etc.
- Radiación ionizante: tienen suficiente energía como para producir ionizaciones de los átomos del medio o materia que es irradiado, es decir, para arrancar un electrón del átomo, van desde los rayos X hasta la radiación cósmica.

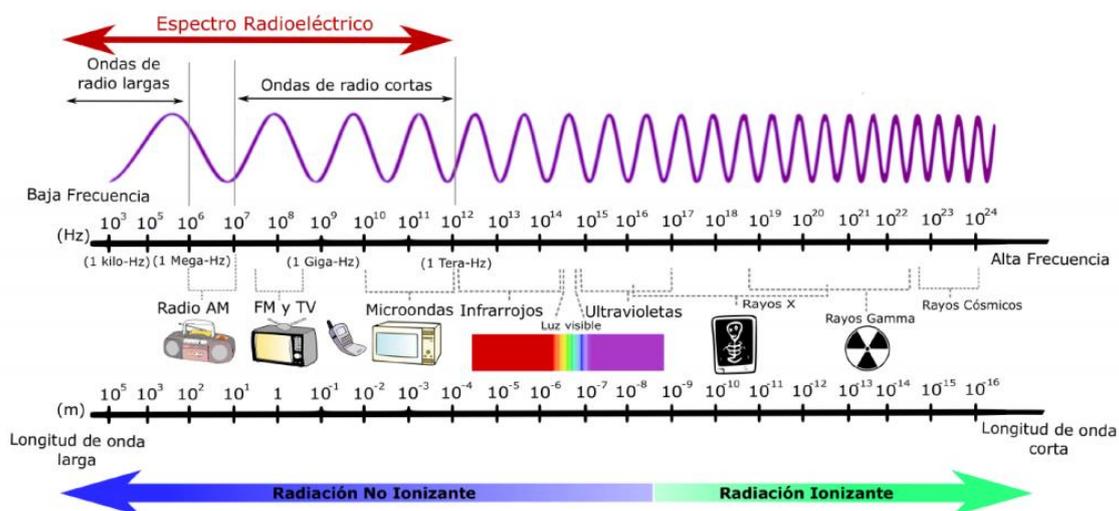


Figura 1.1 Espectro electromagnético.

Los átomos, están compuestos de protones (con carga positiva), neutrones (sin carga o neutros) y electrones (con carga negativa). En condiciones normales un átomo tiene el mismo número de protones que de electrones, lo que convierte a los átomos en entidades eléctricamente neutras, de modo que cuando un átomo eléctricamente neutro capta o pierde electrones, se le denomina ión.

Cada elemento tiene un número fijo de protones, pero su número de neutrones puede variar y, así mismo, su masa. Por tanto, existen elementos en la naturaleza que pueden existir con diferente relación protones/neutrones, denominándose a estos átomos “hermanos” como *isótopos*. La mayoría de elementos poseen más de un isótopo natural (excepto 21 elementos). Algunos elementos, además, tienen isótopos inestables, es decir, que el número de protones y el de neutrones no coinciden, como por ejemplo el carbono. Estos isótopos inestables transforman sus ligaduras nucleares buscando configuraciones más estables, liberando en el proceso energía en forma de radiación ionizante. Se dice entonces que estos isótopos son radiactivos y al proceso de transformación del átomo se le denomina *desintegración del átomo*. Las radiaciones ionizantes que se emiten en la desintegración del átomo son:

- **Radiación alfa o partículas alfa ( $\alpha$ ):** núcleos de *He* totalmente ionizados con bajo poder de penetración y alto poder de ionización. No pueden recorrer más de un par de centímetros en el aire. El problema para la salud puede provenir de la ingesta o inhalación de sustancias que emitan partículas  $\alpha$ . Pueden generar un gran daño en una región focalizada de los tejidos.
- **Radiación beta o partículas beta ( $\beta$ ):** electrón y positrones que salen despedidos a gran velocidad de un suceso radiactivo, debido a su menor masa producen menor energía y por lo tanto menor poder de ionización que las  $\alpha$  pero con un mayor poder de penetración. Se detiene en algunos metros de aire o unos centímetros de agua y puede ser frenada por una lámina de aluminio, el cristal de una ventana, una prenda de ropa o el tejido subcutáneo. Puede dañar la piel, los tejidos superficiales e incluso los tejidos internos si son irradiados al ingerir o inhalar sustancias emisoras de radiación beta.
- **Radiación gamma ( $\gamma$ ):** fotones con alta energía de origen nuclear, es decir, se produce por la reestructuración del núcleo atómico. Presenta un poder de ionización relativamente bajo y una capacidad de penetración alta. Sin embargo, cuando chocan con un núcleo atómico pueden activarlo o hacer que éste emita una partícula cargada o un rayo gamma, por lo que son ionizantes de forma indirecta y suele venir acompañada de radiación  $\alpha$  y  $\beta$ . Para detenerla se hace preciso utilizar barreras de materiales densos como el plomo y el hormigón. Pueden derivar en daños en la piel y tejidos más profundos.
- **Radiación X:** al igual que la radiación  $\gamma$ , son fotones con alta energía, pero es de origen extranuclear, es decir, se producen por una reestructuración de los electrones del átomo. Tienen una capacidad de penetración más baja que la radiación  $\gamma$ .
- **Radiación por neutrones:** aparece en la naturaleza en el proceso de fisión espontánea. No es una radiación ionizante por sí misma, sin embargo, cuando chocan con un núcleo atómico pueden activarlo o hacer que éste emita una partícula cargada o un rayo  $\gamma$ , por lo que son ionizantes de forma indirecta. Los neutrones tienen mayor capacidad de penetración que los rayos  $\gamma$  al no tener carga ni posibilidad de interaccionar eléctricamente con otras partículas y solo puede detenerlos una gruesa barrera de hormigón, agua o parafina, todos compuestos c en hidrógeno.

De las anteriores radiaciones, las radiaciones  $\alpha$  y  $\beta$  son radiaciones corpusculares (emisión de partículas) y las radiaciones  $\gamma$  y X son electromagnéticas.

Lógicamente cada núcleo inestable emitirá su exceso de energía de forma diferente, es decir producirá distintos tipos de radiaciones ionizantes (alfa, beta y/o gamma). También hay que tener en cuenta el grado de inestabilidad, es decir el número de neutrones en exceso o en defecto respecto al número de protones en el núcleo, ya que cuanto más se aleje el número de neutrones de la configuración estable, más intensa será la tensión y mayor la velocidad con la que el núcleo liberará el exceso de energía [3].

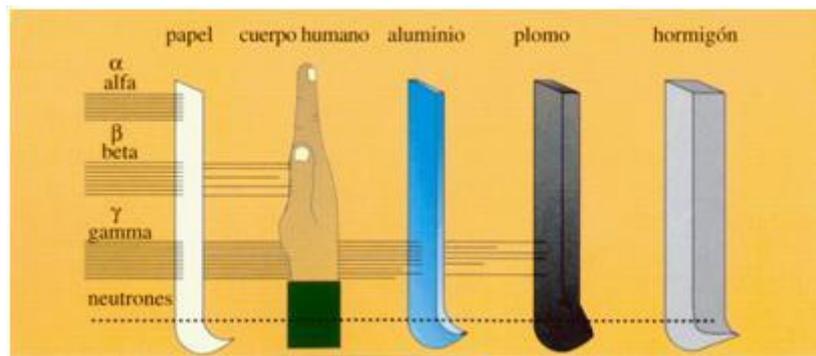


Figura 1.2 Capacidad de penetración de las distintas radiaciones.

Las personas están expuestas continuamente a radiaciones ionizantes. De estas radiaciones, unas proceden de la propia naturaleza, sin que el hombre haya intervenido en su producción y otras están originadas por acciones ocasionadas por el hombre [2].

### 1.1.2 Protección frente a la radiación

La protección frente a la radiación se puede obtener a través de tres vías que son el tiempo, la distancia y el blindaje. Los elementos pesados como el plomo o el tungsteno (wolframio) son materiales adecuados para el blindaje radiológico, sin embargo, estos no se pueden emplear como material de construcción [4].

Los hormigones empleados para la protección radiológica (RSC: Radiation Shielding Concrete) se usan en centrales nucleares, instalaciones para investigación nuclear, instalaciones sanitarias con tratamiento radiológico, aceleradores de partículas, así como para el transporte y almacenamiento de residuos radiactivos.

La protección radiológica se realiza contra los rayos  $\alpha$ , rayos  $\beta$ , rayos X, rayos  $\gamma$  y radiación neutrónica. Sin embargo, fundamentalmente se persigue frenar los rayos  $\gamma$  y la radiación neutrónica debido a que los rayos  $\alpha$  y  $\beta$  son menos penetrantes y de más fácil absorción. Los rayos  $\gamma$  son una onda de alta frecuencia con una gran energía y capacidad de penetración, la cual solo puede frenarse con materiales de alta densidad (alto número atómico).

#### 1.1.2.1 Protección frente a radiación neutrónica

Existen tres principales aspectos de los neutrones importantes para entender la protección frente a la radiación neutrónica [5]:

- Los neutrones no tienen carga eléctrica, de modo que no pueden ser afectados o detenidos por fuerzas eléctricas. Los neutrones ionizan la materia solo indirectamente, lo cual hace a los neutrones un tipo de radiación muy penetrante.
- Los neutrones se dispersan con los núcleos pesados muy elásticamente. Los núcleos pesados difícilmente reducen la velocidad de un neutrón y mucho menos absorben un neutrón rápido.
- La absorción de un neutrón produce el inicio de cierto tipo de reacción nuclear (captación neutrónica e incluso fisión), lo cual conlleva otros tipos de radiación ( $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ ). Es decir, los neutrones hacen que la materia sea radiactiva de forma que además de los neutrones, se deba procurar protección contra los otros tipos de radiación.

Conocidas estas características, el blindaje frente a los neutrones implica fundamentalmente hacer frente a tres problemas derivados de la naturaleza de los neutrones que se describen a continuación [5].

**Ralentizar los neutrones:** los rayos neutrónicos, producidos por las reacciones nucleares, no tienen carga, pero sí alta penetrabilidad. Para frenar los neutrones son adecuados elementos con un bajo número atómico como el hidrógeno, por ello se emplean materiales hidratados con alto contenido de agua. Esto es así debido a que el núcleo de hidrógeno, compuesto solamente de un protón, tiene una masa similar a la de un neutrón y, por tanto, cuando un neutrón impacta contra un núcleo de hidrógeno, se transmite toda o gran parte de la energía cinética del neutrón al núcleo de hidrógeno, reduciendo mucho la energía del neutrón. Se puede establecer una analogía con las bolas de billar que tienen idénticas masas, cuando se hace impactar una contra la otra, la primera bola se detiene y transfiere toda su energía a la segunda (dispersión elástica), la cual comienza a moverse. Sin embargo, si se hace impactar una pelota de ping pong (neutrón) contra una bola de bolos (núcleo pesado), la pelota de ping pong rebotará sin gran variación en su velocidad, solamente variando la dirección. Por tanto, el plomo es poco efectivo para bloquear la radiación de neutrones, ya que los neutrones son partículas sin carga y pueden atravesar fácilmente los materiales densos.

**Absorción de los neutrones ralentizados:** los neutrones térmicos<sup>1</sup> pueden ser fácilmente absorbidos y capturados en materiales con gran sección eficaz (cientos de barn<sup>2</sup>) como el boro, litio o cadmio. Generalmente una capa fina de estos absorbentes es necesaria para proteger frente a los neutrones térmicos. El hidrógeno (en forma de agua), que puede ser usado para ralentizar neutrones, tiene una sección eficaz de 0.3 barn que, aunque no es suficiente, puede valer con el suficiente espesor de agua.

**Protección frente a la radiación producida:** en el caso de la protección con cadmio, la absorción de neutrones tiene como consecuencia una gran emisión de rayos  $\gamma$ . De forma que es necesaria una protección adicional para atenuar los rayos  $\gamma$ . Este fenómeno apenas se produce en el litio y es mucho menos importante en el caso de emplear boro como protección. Además, el boro (en forma

---

<sup>1</sup> Los neutrones se pueden clasificar según su energía, correspondiendo a los neutrones térmicos una energía de 0.025 eV y una velocidad de  $2.2 \times 10^3$  m/s. [6]

<sup>2</sup> Una unidad "barn (b)" equivale a  $10^{-28}$  m<sup>2</sup> (100 femtómetros cuadrados), aproximadamente la sección transversal del núcleo de un átomo de uranio, una medida de la probabilidad para que suceda un evento.

de ácido bórico) es fácilmente soluble en agua haciendo de ésta una combinación eficaz en la protección frente a la radiación neutrónica.

### 1.1.2.2 Protección frente a radiación gamma ( $\gamma$ )

Como se ha dicho, uno de los principales objetivos en la protección contra la radiación es de la atenuación de los rayos gamma, los cuales se transmiten en el material siguiendo la ley de Lambert, Ecuación 1.1[7]:

$$I = I_0 \times e^{-\mu\rho t} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

I: intensidad después de la protección  
 $I_0$ : intensidad incidente  
 $\mu$ : coeficiente de absorción de masa ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )  
 $\rho$ : densidad del material protector  
 t: espesor del material protector

El coeficiente de absorción de masa, depende del material y se puede obtener experimentalmente a partir de la ecuación anterior mediante la medición de las intensidades incidente ( $I_0$ ) y transmitida (I). En la literatura también se puede encontrar el coeficiente de atenuación lineal con la letra griega  $\mu$ , que es el producto  $\mu \times \rho$  y tiene unidades  $\text{cm}^{-1}$ . La atenuación de la radiación gamma se produce por la interacción con la materia, mediante tres procesos: el *efecto fotoeléctrico*, *dispersión de Compton* y la *producción de pares*, aunque los más influyentes son los dos primeros efectos [7].

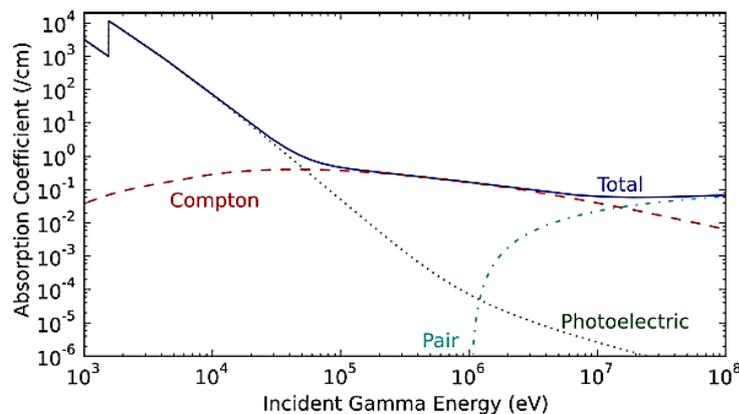


Figura 1.3 Atenuación de la radiación  $\gamma$  mediante tres mecanismos principales.

**Efecto fotoeléctrico:** se produce una interacción entre un fotón (radiación  $\gamma$ ) y un electrón que pertenece a un átomo. El fotón incidente desaparece completamente y se expulsa un fotoelectrón (electrón expulsado por el efecto fotoeléctrico) del átomo de uno de sus niveles de energía. La energía cinética del fotoelectrón expulsado ( $E_e$ ) es igual a la energía incidente del fotón ( $h\nu$ ) menos la energía de ligadura del nivel correspondiente en el átomo ( $E_b$ ). Por tanto, esto solo se produce si  $h\nu$  es mayor a un umbral energético que es  $E_b$ , siendo más probable el efecto en átomos con un alto número atómico  $Z$  (mayor número de electrones) y en los niveles próximos al núcleo.

Debido a la reducida masa del fotón, solo puede transmitir una pequeña parte de su energía al electrón y, el resto, se transmite al núcleo. Sin embargo, cuando la energía del fotón es muy elevada,

un núcleo pesado tampoco es suficiente para manejar el exceso de energía y, debido a esto el efecto fotoeléctrico solo se produce hasta un valor limitado de la energía incidente (Figura 1.3).

El electrón expulsado puede ionizar otros átomos en su camino (ionización indirecta de la radiación  $\gamma$ ) y el hueco dejado en el átomo se suple con otro electrón del nivel de energía inmediatamente inferior hasta llegar al último nivel. Esta reestructuración en cascada de los niveles de energía en el átomo puede provocar la emisión de rayos X, siendo menor la probabilidad a menor número atómico ( $Z$ ) del átomo [8].

**Dispersión de Compton:** es una dispersión no clásica o inelástica en la que solamente una parte de la energía total es transmitida del fotón al electrón. El electrón liberado, denominado electrón Compton o electrón dispersado alcanza una velocidad en función de la energía recibida. El resto de la energía continúa en el fotón con menor velocidad y distinta dirección. La dispersión de Compton solo ocurre cuando la energía incidente sobrepasa el umbral de la energía para el efecto fotoeléctrico. En este caso, el número atómico  $Z$ , influye menos porque el proceso ocurre en los niveles de energía más alejados del núcleo y la energía se divide entre el fotón y el electrón dispersado. El electrón liberado puede, en función de la energía contenida, ionizar otros átomos en su camino. El fotón dispersado continúa su trayecto y puede formar parte de otros procesos Compton hasta que su energía se reduce lo suficiente para que se produzca el efecto fotoeléctrico, entonces el fotón desaparece [8].

**Producción de pares electrón-positrón:** en general la producción de pares es un fenómeno natural en el que la energía se convierte directamente en materia. El fenómeno se puede ver de dos puntos de vista, uno como partícula y antipartícula y, el segundo, como una partícula y un agujero. De esta forma, cuando un fotón altamente energético se acerca a un núcleo atómico interacciona con su campo eléctrico y el fotón se puede convertir en un electrón y un positrón con la misma masa, pero con cargas opuestas. Este proceso se puede producir cuando la energía del fotón es superior a 1.022 MeV y como consecuencia el fotón desaparece y transmite la energía sobrante al núcleo. El electrón producido puede, así mismo, producir la ionización de otros átomos y, por ello, se dice que la radiación  $\gamma$  es indirectamente ionizante. De todas formas, este es un proceso menos frecuente que los dos anteriormente descritos [8],[9].

Por tanto, en el efecto fotoeléctrico el electrón recibe toda la energía de la radiación gamma mientras que en la dispersión de Compton recibe una parte. Ambos efectos son proporcionales al número atómico ( $Z$ ), es decir, a mayor número de protones en el átomo y, por tanto, mayor número de electrones, la probabilidad de interacción con los electrones es mayor lo que se traduce en una mejor protección. Por otro lado, estos dos efectos son inversamente proporcionales a la energía incidente de la radiación gamma.

De esta forma, para protegerse de los rayos gamma se requiere gran cantidad de masa. Los materiales de número atómico y densidad altos protegen mejor y, a mayor energía de los rayos el espesor de la protección debe ser superior. Tales materiales se clasifican según el espesor necesario para reducir la intensidad de los rayos gamma a la mitad, espesor conocido como HVL (del inglés half-value layer, capa de valor medio). Por ejemplo, los rayos gamma que requieren 1 cm de plomo para atenuar su intensidad en un 50% también la disminuyen en igual proporción al atravesar 6 cm de hormigón o 9 cm de tierra compacta.

## 1.2 Tipos de hormigones para protección radiológica

Los tipos de hormigones que se pueden emplear para la protección radiológica son muy diversos, pero básicamente se pueden clasificar en su composición por el tipo de áridos que utilizan. El objetivo fundamental en el blindaje radiológico es lograr un material pesado, que, en el caso del hormigón, es el árido el que más influye en la consecución de dicho objetivo. Existen multitud de áridos de alta densidad aptos para fabricar un hormigón pesado, en función del tipo de radiación que se desea mitigar, la densidad del hormigón que se requiera y la disponibilidad del árido.

Los áridos se pueden clasificar de forma general por su procedencia de la siguiente forma:

- **Áridos naturales:** aquellos áridos que proceden de la extracción de un mineral o roca en alguna mena y que pueden ser la hematita, magnetita o barita entre otros.
- **Áridos sintéticos:** aquellos áridos que se obtienen generalmente como un subproducto de un proceso industrial o son productos comunes en la industria.
- **Áridos procesos:** aquellos áridos que pudiendo ser naturales o sintéticos, son sometidos a algún tipo de proceso para mejorar alguna de sus características como árido para el hormigón, es el caso del árido de uranio empobrecido sinterizado.

A continuación, se muestran de forma más extensa algunos tipos de áridos que existen y se emplean para fabricar diferentes tipos de hormigones.

### 1.2.1 Tipos de áridos

Los áridos juegan el papel principal en la protección radiológica tendiéndose siempre hacia áridos de alta densidad. Los áridos se emplean con dos objetivos, el primero, atenuar los rayos gamma y, el segundo absorber los neutrones. Para el primer objetivo se usan áridos de alta densidad y para el segundo objetivo se utilizan áridos de bajo peso molecular. Por tanto, las proporciones en la mezcla de dichos áridos influirán en las características finales del hormigón en la protección radiológica.

La ASTM C638 los denomina como Clase 1 (protección frente a rayos gamma) y Clase 2 (protección neutrónica). La Clase 1 incluye minerales y rocas con alta densidad y la Clase 2 minerales y rocas que son especialmente efectivos en la absorción de neutrones sin producir grandes penetraciones de rayos gamma, que normalmente contienen cantidades significativas de boro.

El hormigón barítico es uno de los hormigones pesados más utilizado en España para la protección frente a rayos X en techos y paredes de salas médicas, sustituyendo al plomo. Tanto la magnetita como la barita son muy accesibles en España para fabricar hormigones pesados. La magnetita se encuentra en Granada, Sevilla, Badajoz, Huelva, Toledo o León. La barita se encuentra en Girona, Barcelona, Tarragona, Almería, Sevilla, Asturias o Murcia [10].

A continuación se muestra la Tabla 1.1 diversos áridos empleados en el hormigón destinado a la protección radiológica, clasificados según su naturaleza, procedencia y características físicas.

Tabla 1.1 Áridos comunes para protección radiológica.<sup>3</sup>

Mineral natural					Mineral sintético			
Árido	Procedencia <sup>4</sup>	Peso específico <sup>5</sup>	Porcentaje en peso		Árido	Peso específico	Porcentaje en peso	
			Hierro	Agua fija			Hierro	Agua fija
Mineral hidratado					Árido machacado			
Bauxita	—	1.8 - 2.3	0	15 - 25	Escorias pesadas	5.0	0	0
Goethita	Utah, Michigan	3.4 - 3.8	0	8 - 12	Ferrosforos <sup>6</sup>	5.8 - 6.3	0	0
Limonita	Utah, Michigan	3.4 - 3.8	55	8 - 12	Ferrosilicio	6.5 - 7.0	70	0
Mineral pesado					Productos metálicos de hierro			
Barita	Nevada, Tennessee	4.0 - 4.4	1 - 10	0	Barras de refuerzo cortadas	7.7 - 7.8	99	0
Magnetita	Nevada, Wyoming, Montana	4.2 - 4.8	60	1.0 - 2.5	Perforaciones de acero	7.7 - 7.8	99	0
Ilmentita	Quebec	4.2 - 4.8	40	0	Granalla de hierro/acero	7.5 - 7.6	99	0
Hematita	Sur America, África	4.2 - 4.8	70	—	Productos de boro			
Aditivos de boro					Frita de boro	2.4 - 2.6	0	0
Boro calcita	Turquía	2.3 - 2.4	0	0	Ferroboro	5.0	85	0
Colemanita	California	2.3 - 2.4	0	0	Tierra borada de diatomeas	1.0	0	0
					Carburo de boro	2.5 - 2.6	0	0

### 1.2.1.1 Áridos para la protección frente a rayos gamma

Los áridos más comúnmente empleados para la protección frente a rayos gamma o áridos de Clase 1 se mencionan a continuación, como se ha comentado anteriormente, son áridos compuestos de elementos pesados.

**Hematita:** La mayoría de los depósitos de mineral de hematita de gran tamaño provienen de formaciones sedimentarias de vetas alteradas y de manera poco frecuente de acumulaciones ígneas. Estas vetas pueden contener hierro en carbonatos o silicatos. Las impurezas asociadas con la hematita incluyen rocas no minerales y minerales de ganga. La procedencia de los áridos influye en (entre diferentes yacimientos y dentro de los mismos) la tenacidad, compacidad, cantidad de impurezas, resistencia a la abrasión y la idoneidad para su uso como árido de hormigón.

<sup>3</sup> Tabla 11.1 de la ACI 304R-00

<sup>4</sup> Pueden existir otras procedencias.

<sup>5</sup> Material saturado con la superficie seca.

<sup>6</sup> El ferrosforo cuando se usa en el cemento portland podría generar gases inflamables y posiblemente tóxicos que pueden alcanzar grandes presiones si está confinado. En España no se tiene constancia de su utilización.

**Magnetita:** Los depósitos de mineral de magnetita se asocian con depósitos de rocas metamórficas, ígneas o sedimentarias, también en asociación con hematita e ilmenita. Los depósitos pueden formar rocas densas, tenaces, generalmente de grano grueso. Las impurezas asociadas con la magnetita pueden incluir una amplia variedad de minerales de formación de rocas y otros minerales asociados.

**Ilmenita:** muchos depósitos consisten en ilmenita diseminada en roca en lugar de concentrada como uno de los principales minerales formadores de rocas. Las impurezas comunes incluyen componentes de las rocas gabroicas o anorthosíticas asociadas. La procedencia de los áridos influye en (entre y dentro de los yacimientos) la composición, dureza y la idoneidad para su uso como árido de hormigón.

**Goethita:** aparece en formaciones sedimentarias o como un mineral primario en depósitos hidrotérmicos. Los depósitos varían de rocas duras, tenaces y masivas a rocas blandas y tierras flojas. Estas alteraciones ocurren con frecuencia en pocos milímetros.

**Limonita:** es el nombre genérico de óxidos de hierro hidratado de composiciones desconocidas, a veces usado también para la goethita y probablemente mezclas de goethita y hematita. Por esta razón la limonita es considerada una roca más que un mineral. Limonitas de alto contenido de hierro también se llaman minerales de hierro marrón. Frecuentemente, contienen arena, sílice coloidal, arcillas y otras impurezas.

**Barita:** La barita aparece en las vetas que transectan muchos tipos de rocas, concentrada en rocas sedimentarias, y como nódulos residuales en arcillas formadas por la solución de rocas sedimentarias.

La siguiente tabla, Tabla 1.2, muestra un resumen de los minerales mencionados empleados en hormigones con el objetivos de frenar la radiación y junto con algunas de sus principales características.

**Tabla 1.2 Características de los principales minerales empleados frente a la radiación  $\gamma$ .**

Mineral	Fórmula química	Densidad	Dureza Mohs
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5.26	5-6
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	5.2	5.5-6.5
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	4.7	5.5-6
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	4-4.4	5-5.5
Barita	$\text{BaSO}_4$	4.47	3-3.5

En cuanto a la resistencia de los hormigones con áridos de hematita no difiere sustancialmente respecto de un hormigón convencional, sin embargo, la resistencia a tracción sí decrece para contenidos de áridos de hematita del 40-50% en volumen debido a que aumentan los puntos débiles por la oxidación en la interfase del mortero-árido. De acuerdo al código ASTM C 666 la durabilidad del hormigón frente a ciclos hielo deshielo en cuanto a resistencia a compresión es suficiente, lo cual es importante teniendo en cuenta la cantidad de hierro presente que puede provocar problemas de oxidación. La retracción del hormigón por secado disminuye con el contenido de áridos de hematita [11].

### 1.2.1.2 Áridos para la protección neutrónica

Los rayos gamma resultantes del paso por el isótopo más ligero del boro, boro-10, son considerablemente menos penetrantes que los resultantes del paso por el hidrógeno y, por ello, son más frecuentes el boro y sus componentes en la protección neutrónica. A continuación se mencionan algunos de los áridos que son más frecuentes como protección frente a la radiación neutrónica.

**Colemanita:** se encuentra en depósitos de evaporitas de ambientes lacustres alcalinos. Minerales comunes asociados son la ulexita y otros minerales de boro, yeso, calcita y celestina.

**Borocalcita:** la borocalcita o borato de calcio se refiere a los minerales de borato turcos, que probablemente son ulexita o colemanita o mezclas de los ambos (ASTM C638). La ulexita se encuentra en depósitos de evaporita en regiones áridas. Se asocia frecuentemente con colemanita y otros minerales de boro, glauberita, trona, mirabilita, calcita, yeso y halita.

**Cristales de frita de boro:** son vidrios transparentes, incoloros y sintéticos producidos por la fusión y el temple en la fabricación de esmaltes cerámicos. La composición común para la protección radiológica contiene calcio, sílice, alúmina y bajas cantidades de álcalis.

**Ulexita:** suele encontrarse en playas y regiones desérticas, así como en lagos salinos desecados, en los que se forma por precipitación. A la intemperie se descompone un poco con el agua, pues se pierde el sodio.

**Borax:** la producción en Estados Unidos de boro está limitada al bórax y sus derivados obtenidos de forma natural de las salmueras del Lago Searles, CA, y de las salmueras producidas del tratamiento de boratos en el depósito Kramer en CA.

A continuación se muestra la Tabla 1.3 a modo de resumen de los principales minerales empleados en los áridos destinados a la protección frente a la radiación neutrónica así como algunas de sus características.

**Tabla 1.3 Características de los principales minerales empleados en la protección neutrónica.**

Mineral	Fórmula química	Densidad	Dureza Mohs
Colemanita	$\text{CaB}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	2.42	4.5
Ulexita	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	5.2	5.5-6.5
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	4.7	5.5-6

Se debe tener en cuenta que tanto los minerales de boro como la frita sintética de boro producen cierto retardo en el fraguado del hormigón y que podría emplearse un aditivo acelerador adecuado para salvar dicho inconveniente.

### 1.2.2 Hormigones con áridos de uranio empobrecido

Los áridos mencionados anteriormente son los más habituales que se emplean para la protección radiológica y que se contemplan en la normativa. No obstante, existen estudios sobre la utilización de otros áridos.

Estados Unidos a lo largo de su trayectoria militar ha acumulado más de 500.000 toneladas de uranio empobrecido, según datos oficiales. Para minimizar el coste que supone el almacenamiento indefinido de este residuo los Departamentos de Defensa y de Energía ceden gratis [12] el uranio empobrecido a las empresas de armamento nacionales y extranjeras, ya que tanto Estados Unidos como otros países utilizan este material con fines militares. Se emplea debido a su gran densidad, capaz de perforar el blindaje de vehículos militares, y su naturaleza pirofórica, que provoca que una cabeza de proyectil con uranio empobrecido se inflame generando calor y explosión tras alcanzar un objetivo.

El uranio empobrecido está compuesto por una mínima proporción del isótopo fisionable U-235, muy escaso en la naturaleza (0.72%) y principalmente por el otro isótopo de uranio no fisionable, el U-238, el resto del uranio natural en la naturaleza (99.28%). Por tanto, el uranio empobrecido es un residuo obtenido del enriquecimiento de uranio U-235 para la producción del combustible destinado a los reactores nucleares y las bombas atómicas. El material que se utiliza en la industria civil y militar nuclear es el uranio U-235, que es el isótopo que puede ser fisionado y producir una reacción en cadena. Como este isótopo se encuentra en muy bajas proporciones en la naturaleza, el mineral de uranio ha de ser enriquecido, es decir, ha de aumentarse industrialmente su proporción de isótopo U-235.

#### 1.2.2.1 DUCRETE<sup>11</sup>

Estados Unidos ha desarrollado distintos materiales con matrices metálicas y no metálicas, entre los cuales hormigones, que utilizan en su mezcla el excedente de uranio empobrecido con el objetivo de reducir las dimensiones y peso de los contenedores para el almacenamiento, transporte y disposición tanto del combustible gastado (Figura 1.4) como de los residuos radiactivos. Un ejemplo es DUCRETE<sup>TM</sup> que se trata de un hormigón convencional al que se le sustituye el árido tradicional por un árido cerámico de uranio empobrecido, no modificando ningún otro aspecto de la dosificación.

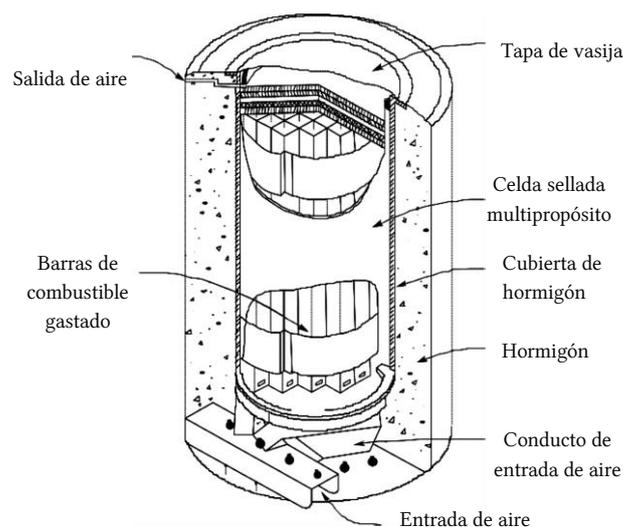


Figura 1.4. Esquema de un recipiente de almacenamiento VSC-24

<sup>11</sup> Fuente: [13]

Es un material que combina la protección de rayos gamma dada por un árido con un número atómico alto con la atenuación de la radiación neutrónica dada por el cemento junto con el agua con un bajo número atómico. Se ha demostrado que existe una proporción óptima de uranio-conglomerante para una combinación de protección de radiación gamma y neutrónica dada y para un espesor de protección de la pared dado. A este respecto, a continuación, se muestra un gráfico (Figura 1.5 [13]) perteneciente a dos tipos de mezclas, una con arena de sílice convencional ( $2.65 \text{ g/cm}^3$ ) y otra con arena de colemanita ( $2.4 \text{ g/cm}^3$ ).

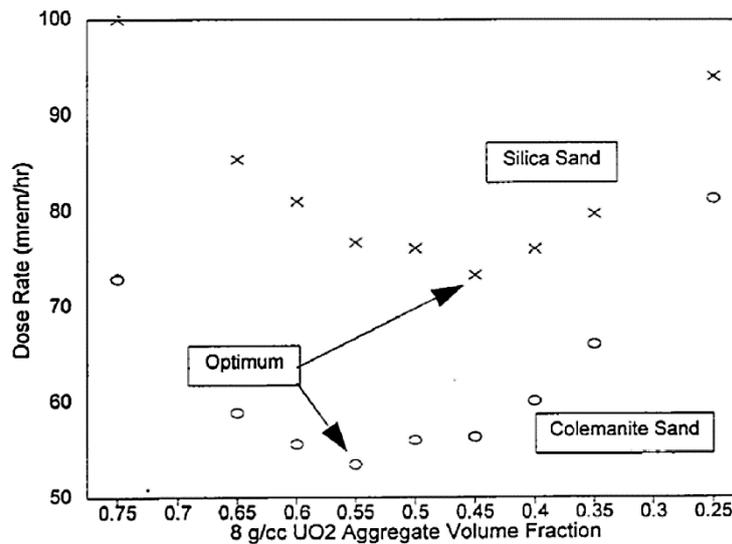


Figura 1.5. Fracción óptima de árido de uranio  $\text{UO}_2$  para mezclas con diferentes tipos de arenas.

Se puede observar que la radiación transmitida en la mezcla con colemanita es menor que en la de arena de sílice. Esto se debe a que la colemanita se compone de boro, lo cual supone un beneficio en la atenuación de la radiación neutrónica. Otros elementos como el hafnio (Hf,  $Z=72$ ) o gadolinio (Gd,  $Z=64$ ) pueden contribuir también a la protección neutrónica, permitiendo vasijas más pequeñas y delgadas.

Para evaluar el potencial de cualquier interacción química entre el óxido de uranio ( $\text{UO}_x$ ) y la pasta de cemento se realizaron ensayos a temperatura de curado variable. A temperaturas de fraguado de hasta  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  no se apreciaron diferencias entre DUCRETE y un hormigón convencional con un fraguado a temperatura ambiente, aunque a altas temperaturas ( $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) tanto los hormigones convencionales como hormigones con árido de  $\text{UO}_x$  sufren una disminución en la resistencia a compresión. Las investigaciones realizadas han determinado que en presencia de temperaturas altas ( $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se puede producir una oxidación no perceptible a simple vista de los áridos de  $\text{UO}_x$ , provocando un incremento de volumen del árido debido a la transición de  $\text{UO}_2$  a  $\text{U}_3\text{O}_8$ . Esto junto con la deshidratación del hormigón provoca la fragmentación y desintegración durante el fraguado que no se produce para un hormigón convencional.

Según el American Concrete Institute (ACI) en la mayoría de los casos, la temperatura de almacenamiento en las vasijas está limitada a 66 °C, aunque en puntos localizados de las paredes interiores se pueden alcanzar hasta 149 °C. Además, durante un accidente de corta duración, algunas partes pueden alcanzar temperaturas de hasta 343 °C. La siguiente tabla (Tabla 1.4) muestra las condiciones de temperatura límite de trabajo para este tipo de recipientes dadas por la ACI.

**Tabla 1.4. Temperaturas límite del hormigón para almacenamiento de combustible gastado. [13]**

Vasija	Referencia	Temperatura normal	Temperatura local en período largo	Temp. local en período corto (accidente)
Recipiente de hormigón de uranio empobrecido	ACI-349 Apéndice A y Guía NRC <sup>12</sup>	66°C	93-149°C	177-343°C

Aunque el mecanismo exacto que produce la oxidación del árido como combinación de las altas temperaturas y la deshidratación del hormigón no se conoce todavía, se han desarrollado áridos de uranio empobrecido encaminados a reducir la oxidación a altas temperaturas en presencia de agua y oxígeno. Un ejemplo de ello es el árido DUAGG (Depleted Uranium Aggregate) que consiste en un árido de uranio empobrecido estabilizado desarrollado por la compañía STARMET (EEUU).

El árido estabilizado DUAGG consiste en partículas de uranio sinterizadas<sup>13</sup> embebidas en una matriz ligante de arcillas, boro, óxido de hierro y otros materiales de composición similar al basalto que se calienta hasta lograr una fase cristalina con las partículas de uranio. El ligante se basa en el basalto debido a su resistencia a la corrosión en ambientes húmedos y a altas temperaturas. Este ligante actúa como barrera del oxígeno impidiendo la corrosión de las partículas de uranio y disminuyendo la temperatura de sinterizado del  $UO_x$  (1700°C) a unos 1300 °C, lo cual aporta un beneficio en la eficiencia energética del proceso.

La Figura 1.6 correspondiente a un escáner del microscopio de electrones de la estructura de una briqueta DUAGG, muestra cómo las partículas esféricas de  $UO_x$ , en gris en la imagen, quedan cubiertas y rodeadas por el ligante mencionado anteriormente, consistente en una fase líquida a la temperatura de sinterizado compuesta por Si, Al, Ca, Ti, K, Na, Zr, Fe, y Mg.

Realizando los mismos ensayos de resistencia a compresión, se comprobó que a temperaturas bajas los resultados eran similares, sin embargo, a temperaturas más altas el comportamiento de las muestras con DUAGG mejora. Para 250 °C la resistencia a compresión se reduce tanto para las muestras de DUAGG como para el hormigón convencional. Además, no se observó al microscopio ningún rastro de oxidación en la superficie del árido DUAGG.

<sup>12</sup> Nuclear Regulatory Commission

<sup>13</sup> El sinterizado es un proceso que parte de un material pulverulento que mediante temperatura (inferior a la de fusión) y presión logra la unión de las partículas aumentando el tamaño y la resistencia de las mismas. Consta de 2 fases en las que se ajustan el tiempo y la temperatura para conseguir la mayor densidad en el material.



Figura 1.7. Briquetas DUAGG.

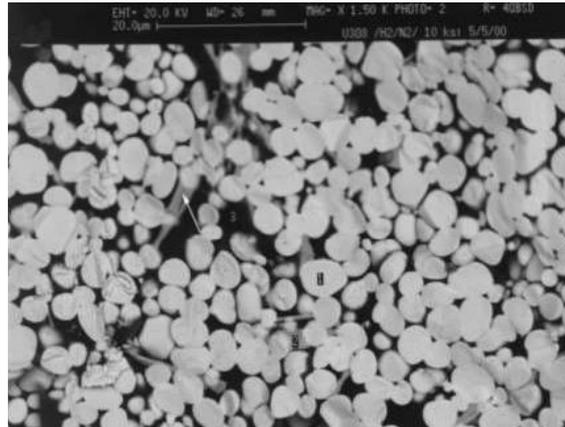


Figura 1.6. Escáner del microscopio de electrones de la superficie fracturada de DUAGG.

Desde el punto de vista medioambiental, hay que considerar el potencial de lixiviación que tiene el uranio en sus distintas formas como componente de la matriz de hormigón. El uranio está considerado como un metal tóxico (no pesado) el cual se ha estudiado mediante el ensayo de la EPA (Toxic Characteristic Leaching Procedure, TCLP) que ha arrojado un valor de lixiviación de 0.42 mg-U/L, estableciéndose un límite de 0.03 mg-U/L para el agua potable. Para los casos en que se requiera un material no tóxico, como puede ser el blindaje de salas médicas, se suele recurrir al hormigón convencional o láminas de plomo, aunque una opción más eficiente para salas de radioterapia de alta energía es el uso del hormigón con galena (Apartado 1.2.2.4).

Tabla 1.5 Composición de áridos DUAGG y RZK-VNIINM (% en peso). [13]

Componente	DUAGG	Árido RZK-VNIINM
UO <sub>2</sub>	91.69	92.58
Bentonita	3.09	3.17
Pómice	1.09	–
Talco	0.13	–
Ca(OH) <sub>2</sub>	0.75	–
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.05	0.33
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.24	–
TiO <sub>2</sub>	1.56	1.42
ZrO <sub>2</sub>	0.81	0.67
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.59	–
Datolita	–	1.83
Total	100	100

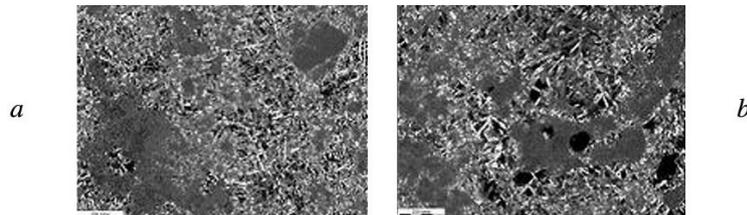
Por otro lado, recientemente (2014), un grupo ruso de investigadores han desarrollado un hormigón similar basado en DUCRETE, el cual, han denominado RZK-VNIINM [14] y modifica ligeramente el árido empleado. El nuevo árido reduce el número de componentes con el que se fabrica y emplea UO<sub>2</sub> obtenido mediante un proceso a altas temperaturas. Así mismo, simplifica el proceso de sinterización con el objetivo de reducir costes. En la Tabla 1.5, se presenta una tabla con la composición de ambos áridos a modo de comparativa.

El ligante cristalino que envuelve a las partículas de  $UO_2$  (Figura 1.6), se produce en un proceso sensiblemente diferente al empleado por STARMET en el caso de árido DUAGG, este es más simplificado con el objetivo de reducir el coste de producción del árido. A continuación, en la Tabla 1.6 se presenta una comparativa de los procesos de fabricación de ambos tipos de áridos.

**Tabla 1.6 Operaciones para obtener el árido cerámico.**

Proceso	DUAGG (procedimiento STARMET)	Árido RZK-VNIINM
1	Mezcla de componentes	Mezcla de componentes
2	Prensado en frío	Prensado en frío
3	Secado 1 h, 900°C	Molienda de una mitad del árido para obtener la fracción de la composición requerida
4	Sinterizado 1 h, 1250°C + 1 h, 1300°C	Secado 1 h, 700°C
5	Molienda para obtener la fracción de la composición requerida	Sinterizado de la mitad del árido 1 h, 1250°C

La diferencia estriba en el proceso de sinterizado, el cual, con el procedimiento del STARMET consta de dos etapas, 1 h a 1250 °C y 1 h a 1300 °C, y con el árido RZK-VNIINM solamente 1 h a 1250 °C. La estructura del ligante cristalino que se consigue se puede ver en la siguiente imagen:



**Figura 1.8 Metalografía de muestras de DUAGG (a) y árido RZK-VNIINM (b).**

Se observa que en ambas muestras el óxido de titanio aparece con dos morfologías, cristales largos y separados y en forma de cristales agregados con formas isométricas. Se distinguen claramente la fase cristalina (negro) y la fase de rutilo (óxido de titanio) con partículas alargadas con un alto color de interferencia. La densidad lograda con el árido RZK-VNIINM ha sido de 7.84 g/cm<sup>3</sup>, mientras que en el caso del árido DUAGG se llegó hasta 8.1 g/cm<sup>3</sup>.

### 1.2.2.2 DUPoly

Este material desarrollado por el Brookhaven National Laboratory (BNL) no es un hormigón, sin embargo, se incluye en este trabajo debido a que está concebido para el mismo propósito que los hormigones anteriormente mencionados. Se trata de un material que utiliza el uranio empobrecido en una matriz de polietileno de baja densidad, denominándose DUPoly. Es un material adecuado para reducir tanto la radiación gamma como la radiación neutrónica y puede ser calentado y reutilizando o extraer el uranio de la matriz para otros usos. El punto de fusión del polietileno es de 140 °C, aunque la temperatura de trabajo máxima es de 100 °C. El polietileno empleado puede provenir de plásticos reciclados de la industria, así como el uranio puede tener diferentes granulometrías o incluso ser pulverulento.

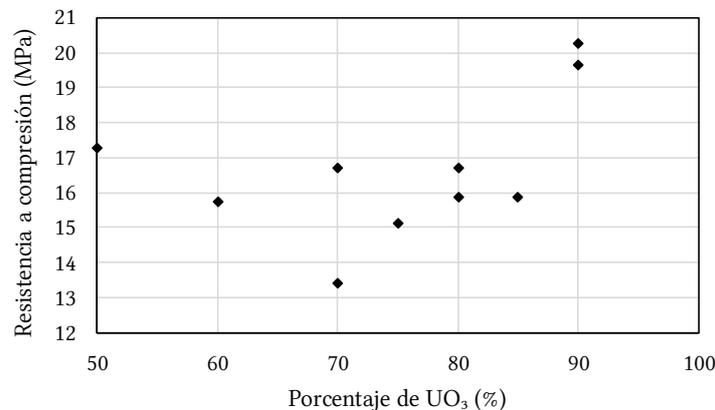


Figura 1.9 Resistencia a compresión de DUPoly en función de la cantidad de UO<sub>3</sub>.

Utilizando UO<sub>3</sub> hasta en un 90% en peso en la matriz de polietileno se puede alcanzar una densidad de 4.2 g/cm<sup>3</sup>, aunque empleando UO<sub>2</sub> se estima una densidad de 6.1 g/cm<sup>3</sup>. Los ensayos de compresión realizados arrojan los resultados mostrados en la Figura 1.9 en función del porcentaje en peso empleado en las muestras.

Para poder ser utilizado este material, debe formar parte de un diseño que cumpla mecánicamente con los criterios de servicio sin una contribución física de los materiales de protección. Además, el UO<sub>3</sub> es ligeramente oxidante y puede liberar oxígeno en un ambiente reductor cuando se calienta. Por ello, se deben evitar las partículas finas y las altas temperaturas.

### 1.2.2.3 PYRUC

PYRUC hace referencia a un compuesto de uranio pirolítico que consiste en uranio empobrecido en forma de pellet o en microesferas junto con una matriz sólida que lo une. La matriz puede ser un material bituminoso, resinas o incluso cemento con el fin de unir las partículas de uranio. Las microesferas de uranio pueden estar o no estar cubiertas de una capa de carbono pirolítico formando partículas de carburo de uranio. Las microesferas de uranio se crean mediante una técnica conocida a través de una precipitación de nitrato de uranio. Esta técnica es utilizada desde la década de los 60 como un método alternativo en la fabricación de combustible nuclear. El conjunto de las microesferas y la matriz de unión pueden producir un compuesto apto tanto para la protección neutrónica como para la radiación gamma. El proceso de creación de PYRUC que ilustrado de forma esquemática en la Figura 1.10.

Debido a la falta de fondos, no se han desarrollado ensayos que aporten información sobre las características mecánicas y físicas del material, por tanto, actualmente no se encuentran datos disponibles sobre densidad o resistencia a compresión del material. Se estima que para matrices de emplean un material bituminoso, la densidad sería comparable a la de DUPoly.

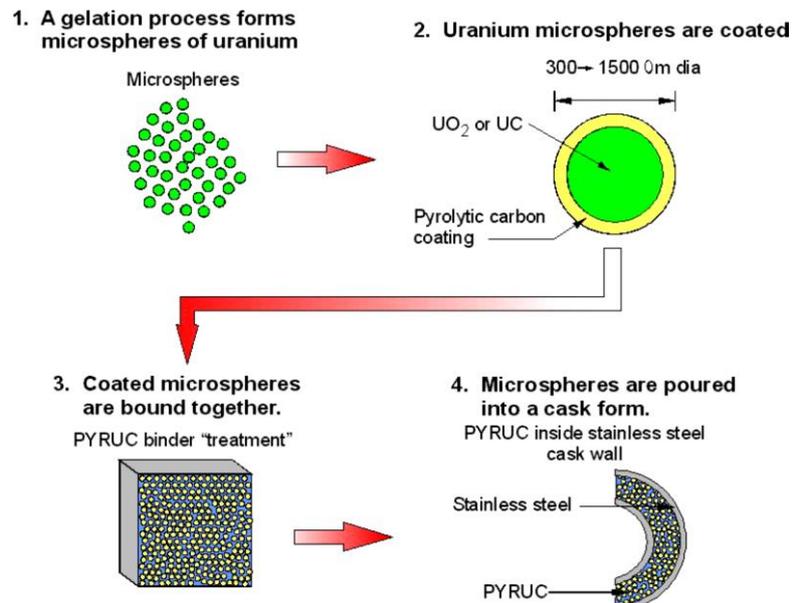


Figura 1.10 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de PYRUC.

#### 1.2.2.4 Hormigón de alta densidad con galena<sup>16</sup>

Las salas de radioterapia emplean ampliamente como material de blindaje plomo u hormigones, tanto convencionales como de alta densidad. El plomo es eficaz en salas de rayos X de baja energía donde la principal interacción de los fotones con el número atómico es el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, en salas de alta energía con radiación gamma y rayos X se requieren grandes espesores en las paredes y, debido al bajo coste de construcción, se emplea habitualmente hormigón convencional, aunque también se emplea hormigón barítico de alta densidad ( $3500 \text{ g/cm}^3$ ). El hormigón de alta densidad es adecuado cuando se requiere reducir los espesores, sin embargo, su inconveniente es su alto precio. Con el objetivo de crear un hormigón de alta densidad a un menor precio, un equipo de investigadores de la universidad de Shiraz (Irán) ha desarrollado un estudio con hormigones que emplean galena como sustituto de la arena silíceo en el hormigón.

La galena es un mineral de sulfuro de plomo con una densidad aproximada de  $7.5 \text{ g/cm}^3$ , una estructura cristalina idéntica a la de la halita o sal común y un contenido en plomo del 86%, convirtiéndolo en el mineral de plomo más importante.

La muestra preparada con galena, de un total de 1811 g, estaba compuesta por 1300 g de galena y tenía una relación de agua-cemento (a/c) de 0.25. La muestra presentaba una densidad de 4.8

<sup>16</sup> Fuente: [15]

$\text{g/cm}^3$  y la galena empleada  $7.4 \text{ g/cm}^3$ , por tanto, la densidad lograda es significativamente más alta que incluso la de hormigones de alta densidad con barita ( $\geq 3.5 \text{ g/cm}^3$ ).

Para medir la atenuación de los rayos gamma se expuso la muestra a un haz de rayos gamma del isótopo cobalto-60 (1.25 MeV). Así mismo, se realizaron ensayos de resistencia a compresión. Los resultados mostraron una mejora en cuanto a protección radiológica, así como en la resistencia a compresión en comparación con el resto de las muestras realizadas con hormigones habitualmente empleados para la protección radiológica.

Las muestras de galena realizadas en el estudio han mostrado unas características de resistencia y protección superiores al resto de muestras realizadas con materiales de alta densidad a excepción del uranio empobrecido. Considerando los posibles riesgos que puede tener el uranio empobrecido en cuanto a la emisión de radiación, se puede considerar el hormigón de galena como un sustituto no radiactivo para aplicaciones como el blindaje de salas de radioterapia, así como en vasijas para el transporte o almacenamiento de residuos radiactivos.

### 1.3 Dosificación

Los estudios existentes sobre hormigones pesados se han centrado siempre en obtener hormigones aptos para la construcción de centrales nucleares. Por este motivo, las dosificaciones más estudiadas y quizás extendidas de hormigones de alta densidad tienen que ser modificadas en algún aspecto. Para hormigones estructurales lo lógico es hablar de cantidades de cemento comprendidas entre 280 y  $480 \text{ kg/m}^3$  y una relación agua/cemento alrededor de 0.5.

El hormigón con árido precolocado se utiliza tanto en reparaciones como en nuevas construcciones y se realiza colocando el árido grueso primero y después inyectando una lechada de cemento en él de manera que rellene todos los huecos entre los áridos. Este hormigón fue concebido por Lee Turzillo y Louis S. Wertz [16] en 1937 durante la construcción de un túnel ferroviario en Santa Fe (California). Es un método recomendado para los hormigones pesados, ya que, debido a la elevada densidad de los áridos, existe riesgo de segregación. Además, sería más idóneo realizar el bombeo de la lechada de cemento desde la parte inferior para evitar el burbujeo de aire y las burbujas atrapadas dentro de la mezcla que puedan dar lugar a coqueas en el hormigón final [17],[18].

Tabla 1.7. Dosificación típica para hormigón de alta densidad.[19]

Hormigón colocado convencionalmente									
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia Compresión a edad de 3 meses (MPa)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Árido grueso (kg/m <sup>3</sup> )				Agua de amasado (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de agua <sup>17</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
			Finos		Gruesos			Mínimo	Máximo
4810	34.5	376	Granalla de hierro	3120			192	56	192
			Magnetita	1120					
4810	33.6	386	Ferrosforo	1470	Ferrosforo	2740	203	58	203
4200	36.9	380	Ferrosforo	1120	Ferrosforo	1120	205	58	205
			Barita	560	Barita	800			
3720	44.8	389	Magnetita	1380	Magnetita	1760	184	91	216
3560	41.4	309	Barita	1380	Barita	1680	186	46	186
3510	44.8	399	Mineral de hierro hidratado	1310	Mineral de hierro hidratado	1600	192	147	280
3040	39.6	335	Serpentina	800	Magnetita	1700	208	146	304
Hormigón con árido precolocado									
5540	207	330	Magnetita	700	Perforaciones	4330	181	56	189
4810	34.5	317	Magnetita	670	Magnetita	1070	175	66	192
					Perforaciones	2560			
4210	41.4	356	Limonita	450	Limonita	960	195	208	351
					Perforaciones	2240			
4200	33.1	317	Magnetita	670	Magnetita	1950	175	75	202
					Perforaciones	1070			
3920		312	Serpentina	370	Serpentina	769	157		
					Perforaciones	2320			
3910	34.5	280	Magnetita	590	Magnetita	2880	155	77	191
3440	34.5	364	Limonita	460	Limonita	450	200	175	320
					Magnetita	1950			

Como una comparativa entre un hormigón convencional y un hormigón pesado se muestra a continuación unas posibles dosificaciones de ambos hormigones (<sup>18</sup>).

<sup>17</sup> El contenido máximo de agua es el peso del agua cuando el hormigón está húmedo. El contenido de agua mínimo es la cantidad que queda después del secado a una temperatura constante de 85 ° C. La diferencia entre el máximo contenido de agua y la cantidad de agua de amasado añadida es el agua de cristalización retenida por el árido. La diferencia entre el contenido mínimo de agua y el agua de cristalización es el agua retenida por la pasta de cemento endurecida.

<sup>18</sup> Fuente: (Pere Borralleras, Marketing EB-A BASF C.C. Iberia)

**Tabla 1.8 Comparativa entre las dosificaciones de hormigón convencional y pesado.**

Componente	HA-30/F/20/IIa Convencional		Hormigón HA-30/F/20/IIa Alta densidad	
	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Proporción (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Proporción (kg/m <sup>3</sup> )
CEM II A/L 42, 5R	3.1	325 (105 l/m <sup>3</sup> )	3.1	315 (102 l/m <sup>3</sup> )
Agua	1.0	180 (180 l/m <sup>3</sup> )	1.0	160 (160 l/m <sup>3</sup> )
Árido	2.5	1845 (738 l/m <sup>3</sup> )	4.5	3420 (760 l/m <sup>3</sup> )
Aditivo superplastificante	1.1	2.6 (2.4 l/m <sup>3</sup> )	1.1	3.1 (2.8 l/m <sup>3</sup> )
Hormigón final	2.353		3.900	

La muestra una dosificación empleada para fabricar un hormigón tipo DUCRETE, el cual ya se describió en el apartado 1.2.2.1, se dan los ratios obtenidos de [13], así como una estimación de la dosificación en kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 1.9 Composición y propiedades físicas de una muestra DUCRETE.**

	Cemento	DUAGG	Ceniza volante	Agua	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad DUAGG (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)
Ratio	1	9.6	0.2	0.32	5.72	8.1	29.7
kg/m <sup>3</sup>	520	4992	104	166.4	-	-	-

RZK-VNIINM se hizo una dosificación experimentalmente para reducir al máximo los poros y la relación agua cemento con el fin de obtener la máxima resistencia y densidad del hormigón. De esta forma se llegó a la siguiente dosificación:

**Tabla 1.10 Dosificación del hormigón RZK-VNIINM (kg/m<sup>3</sup>).**

Cemento Portland M500-D0	450
Pellets de hierro fundido cortados No.5	1050
Plastificante S-3	5
Granulometría árido RZK-VNIINM (mm)	
5-10	2500
1.25-5	1230
0.63-1.25	1240
Agua (l/m <sup>3</sup> )	165

### 1.3.1 Cemento

Los hormigones usados para protección radiológica no necesitan cementos especiales a los empleados en los hormigones convencionales. La normativa americana ACI 304.3R-96 aconseja evitar cementos Tipo III o aceleradores para evitar un excesivo y rápido aumento de la temperatura por

la hidratación del cemento, salvo que la temperatura del hormigón esté controlada por sistemas especiales de refrigeración. Así mismo, si los áridos tienen componentes que puedan reaccionar con los álcalis, deben utilizarse cementos con bajo contenido de estos componentes.

Algunas dosificaciones de cemento han sido dadas anteriormente en el apartado 1.3, aunque como regla general es recomendable adoptar cantidades de cemento mayores a  $350 \text{ kg/m}^3$  [4] y con relaciones de agua/cemento altas, para lograr una pasta con un alto contenido de hidrógeno que colabore en la protección frente a la radiación neutrónica.

### 1.3.2 Agua<sup>19</sup>

El agua utilizada en el amasado de hormigones de alta densidad debe seguir las recomendaciones de la ACI 301. Como regla general, el agua de mezclado debe ser potable. No debe contener impurezas que puedan afectar la calidad del hormigón. No debe tener ningún tipo de sabor o contener limo u otras materias orgánicas en suspensión. Aguas muy duras pueden contener elevadas concentraciones de sulfatos y pozos de agua de regiones áridas pueden contener sales disueltas dañinas. Si tiene una calidad dudosa, el agua debe ser analizada químicamente.

## 1.4 Características físico-mecánicas

La resistencia a compresión, para un contenido de cemento y relación agua/cemento dados, depende principalmente de la actividad puzolánica de los materiales empleados, así como de las propiedades físico mecánicas de los áridos. Entre los materiales puzolánicos, el humo de sílice ha mostrado mejores resultados que la ceniza volante y la escoria de alto horno [21], logrando los mayores incrementos en la resistencia a compresión. Así mismo, el árido de magnetita en el hormigón ha obtenido mayor resistencia a compresión y mayor atenuación de la radiación y que el hormigón con barita, goethita y serpentina, aunque el hormigón barítico tiene una resistencia similar. Se puede también sustituir no solo el árido grueso, sino que sustituyendo la arena por árido fino de magnetita se logra mayor densidad y mejor atenuación de la radiación.

En cuanto la resistencia a compresión, P. Lessing ha realizado ensayos en el INEEL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory) comparando hormigones convencionales y DUCRETE para diferentes edades de curado. Los resultados obtenidos de dichos ensayos se muestran en la Figura 1.11 [18]. Para el hormigón DUCRETE se han utilizado como sustitutivo del árido grueso pellets cilíndricos de uranio empobrecido de 0.25" de diámetro y 0.5" de largo.

La dispersión de los resultados en cuanto a la resistencia a compresión se debe al reducido tamaño de las probetas empleadas de 5 cm de diámetro y 10 cm de alto. Este tipo de probeta desvirtúa también el efecto del tiempo de curado en la resistencia a compresión. Sin embargo, se puede observar que las resistencias a compresión de un hormigón convencional y el DUCRETE son comparables.

---

<sup>19</sup> Fuente: [20]

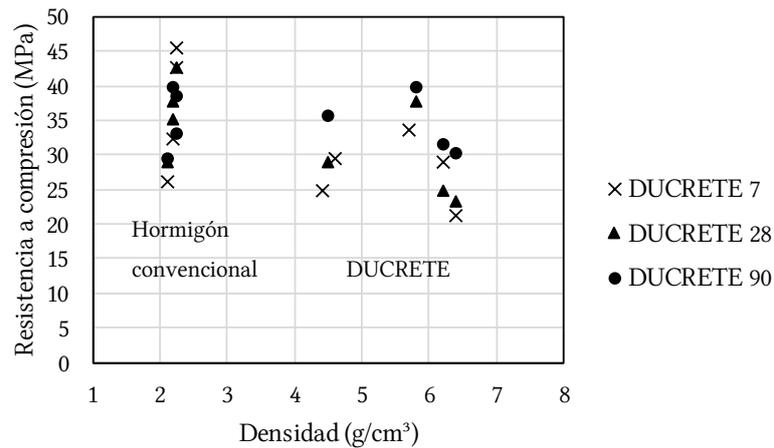


Figura 1.11 Ensayo a compresión de probetas DUCRETE y hormigón convencional a temperatura ambiente.

Las propiedades mecánicas obtenidas para el hormigón RZK-VNIINM, variante rusa de DUCRETE, con la dosificación dada en el apartado 1.2.2.1 se obtuvieron mediante ensayos en probetas de  $40 \times 40 \times 160$  y  $70 \times 70 \times 70$  mm tras un periodo de 28 días en serrín húmedo. La muestra los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas, así como una comparativa con los valores medios obtenidos con el hormigón DUCRETE.

Tabla 1.11 Propiedades mecánicas del hormigón RZK-VNIINM y DUCRETE.

Parámetro	RZK-VNIINM	DUCRETE
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	6.5	5.7
Resistencia a compresión (MPa)	67.2	29.7
Módulo de elasticidad (GPa)	55.5	-
Módulo de Poisson	0.22	-
Máxima deformación (mm/m)	$2.62 \times 10^{-3}$	-

Se observa que tanto la densidad como la resistencia alcanzadas por el hormigón RZK-VNIINM fueron superiores a los obtenidos con DUCRETE. El árido obtenido presentó un 20% de incremento

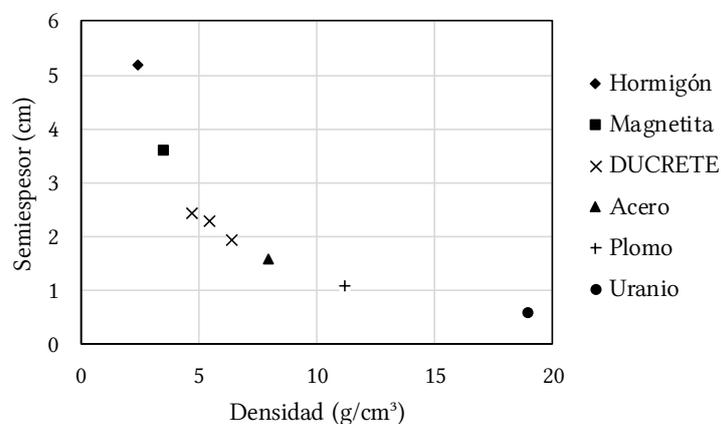


Figura 1.12 Semiespesor de la pared con DUCRETE en comparación con otros materiales para 1.25 MeV.

en la resistencia a compresión (265 MPa) respecto a las muestras realizadas según el procedimiento del árido DUAGG.

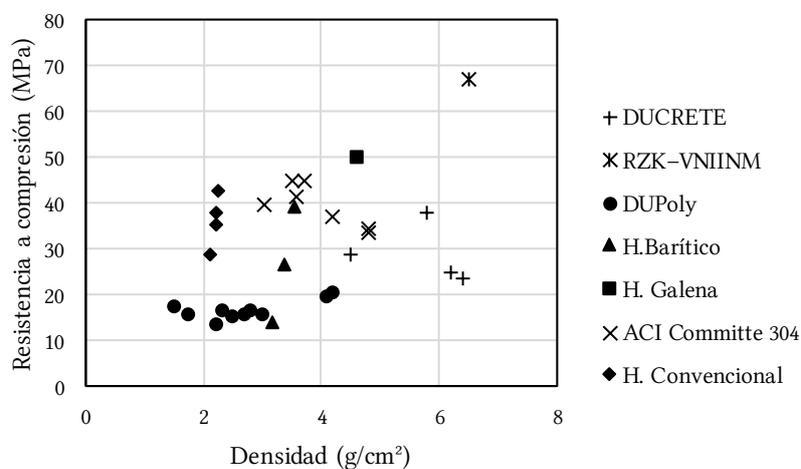
La reducción de espesor que se consigue con este material se representa en la siguiente gráfica comparativa (Figura 1.12 [13]) junto con otros materiales empleados tradicionalmente para la protección frente a los rayos gamma. Los dos valores de DUCRETE con densidad más baja son valores medidos, mientras que el tercer valor es un valor que se ha predicho en base a la densidad del árido. La medida del semiespesor o HVL (por sus siglas en inglés) indica el espesor del material para el cual se atenúa el 50% de la energía incidente y es habitual su empleo para la evaluación de la capacidad protectora de los diferentes materiales contra la radiación.

La alternativa que se ofrece a los hormigones con árido de uranio, es el hormigón con galena, el cual no tiene riesgo por toxicidad, adecuado para salas médicas y de radioterapia. La Tabla 1.12 muestra una comparativa del hormigón con galena y el hormigón con árido de barita [15].

**Tabla 1.12 Características de hormigones empleados en protección radiológica.**

	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Semiespesor de la pared (cm)	Resistencia a compresión (MPa)
Hormigón convencional	2.5	5.25-6.2	30
Hormigón barítico 1	3.18-3.55	3.6-4.0	14-39.4
Hormigón barítico 2	3.49	3.8	-
Hormigón barítico 3	-	4.4	-
Hormigón super pesado	3.8-4.2	-	-
Hormigón de galena	4.2-4.6	2.56	50

La Figura 1.13 muestra un resumen de resultados relativos a la relación de la densidad con la resistencia a compresión obtenidas en los diferentes ensayos para todos los hormigones anteriormente mencionados. Observando el hormigón convencional, se observa que no existe una variación significativa en la resistencia a compresión de los hormigones destinados al blindaje radiológico. Solamente el material DUPoly presenta una resistencia general menor, aunque es el único que realmente no es un hormigón, sino que consiste en una matriz de polietileno con uranio empobrecido que presenta buenas características de protección radiológica.



**Figura 1.13 Relación densidad-resistencia a compresión de diferentes hormigones para blindaje radiológico.**

### 1.4.1 Durabilidad

El efecto de la duración de las altas temperaturas incide negativamente y es inversamente proporcional a las características mecánicas de cualquier tipo de hormigón [22]. El hormigón con áridos de hematita es más resistente a los efectos de las altas temperaturas y en un atenuador más eficaz tanto de la radiación  $\gamma$  como de la radiación neutrónica. La disminución de la densidad, coeficiente de atenuación y resistencia en presencia de altas temperaturas se debe a la pérdida de agua en los áridos y la descomposición de la pasta de cemento.

La degradación del árido de uranio en el hormigón para el almacenamiento de combustible gastado es conocida, primero la superficie oxidada de la matriz se libera por lixiviación y después los oxidantes atacan la superficie de  $UO_2$ , repitiéndose el proceso de oxidación y liberación por lixiviación. En el caso del árido DUAGG empleado para fabricar DUCRETE y que consiste en un árido de uranio empobrecido cubierto por una capa sinterizada de un material similar al basalto, la degradación que sufre por ataque químico es muy baja. Se han realizado estudios sometiendo probetas a condiciones más exigentes a las de trabajo sin producirse cristales perjudiciales que pudieran resultar de una reacción álcali-árido [22]. Los resultados obtenidos muestran que el árido DUAGG tiene un comportamiento similar al vidrio nuclear que se utiliza para el almacenamiento de largo periodo de los residuos nucleares y que ha sido estudiado extensamente y comprobado su seguridad.

El coeficiente de atenuación lineal ( $\mu$ ) decrece con los ciclos de hielo-deshielo (H-D), de modo que la protección frente a la radiación se ve afectada por los ciclos [23]. Se puede mitigar el efecto de la reducción del coeficiente de atenuación lineal por los ciclos H-D aumentando la relación agua/cemento, ya que mientras que para condiciones sin ciclos de H-D la relación a/c no influye

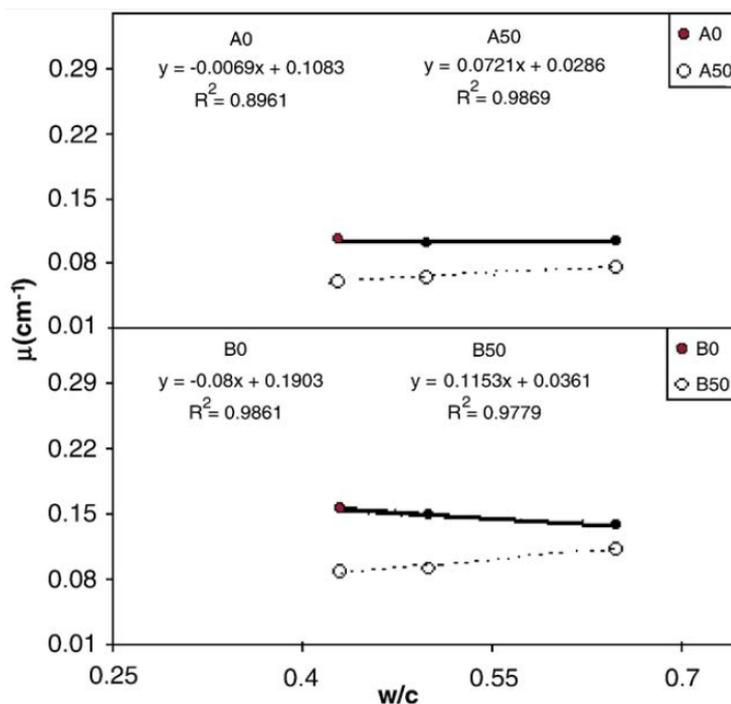


Figura 1.14 Coeficiente de atenuación lineal en función de la relación a/c.

significativamente, bajo condiciones de H-D el coeficiente de absorción lineal aumenta con la relación a/c. La Figura 1.14 [23] muestra este efecto para un hormigón sin ciclos H-D (A0, B0) y para un hormigón con 50 ciclos H-D (A50, B50). Se muestran los resultados correspondientes a dos tipos de hormigones, por un lado, un hormigón convencional (A), y por otro, un hormigón barítico (B).

## 1.5 Aplicaciones<sup>20</sup>

Algunas aplicaciones que tienen los hormigones descritos ya se han mencionado y fundamentalmente se basan en el requerimiento de una alta densidad. De forma general, las aplicaciones a las que pueda destinarse este hormigón se pueden dividir en:

- Utilización en la industria nuclear
- Otras aplicaciones

### Utilización en la industria nuclear

El uso mayoritario del hormigón para blindaje radiológico se produce en la industria nuclear. En una planta de producción de energía nuclear se producen diferentes tipos de radiación y este hormigón ofrece una barrera de protección biológica frente a este tipo de radiación. Las plantas de reprocesamiento son también instalaciones que requieren de una protección biológica (Figura 1.15).

La radiación puede ser generada en diversos lugares además de las instalaciones destinadas a la industria nuclear como puede ser la investigación industrial, universidades, centros de aceleración de partículas, salas de radioterapia o destinadas a la medicina como los departamentos de oncología que utilizan un acelerador lineal.



Figura 1.15 Instalación de reprocesamiento en Tokai, Japon.

### Otras aplicaciones

Como alternativa a la aplicación en la industria nuclear, los hormigones recogidos en este capítulo son también adecuados para usos donde se requiere una alta densidad. Puede ser empleado

---

<sup>20</sup> Fuente: [24]

para estructuras offshore en la industria petrolera para cubrir los conductos que se encuentran sumergidos en el fondo del mar. La Figura 1.16 muestra un hormigón con magnetita empleado como protección de los conductos submarinos.

La alta densidad también se requiere en la cimentación de plataformas petrolíferas y puentes. La Figura 1.17 muestra la plataforma petrolífera del Mar del Norte en la cual se empleó una cantidad considerable de hormigón de alta densidad.



Figura 1.16 Disposición de hormigón con magnetita como protección de las conducciones submarinas.



Figura 1.17 Hormigón de alta densidad empleado para la estabilización de las patas de la plataforma del Mar del Norte.

## 1.6 Conclusiones<sup>21</sup>

- El hormigón para el blindaje radiológico no ha sido aún ampliamente utilizado para la protección contra la radiación, y el estudio sobre sus características es incompleto. Hasta ahora, la investigación sobre el hormigón para protección radiológica se basa fundamentalmente en las propiedades de los materiales constituyentes y del hormigón con diferentes adiciones.
- No existen especificaciones ni normativas para el diseño de dosificaciones del hormigón. Deben hacerse otros estudios sobre las propiedades de los hormigones para protección radiológica, así como establecer una normativa para la aplicación de dichos hormigones.
- Mientras la industria nuclear siga desarrollándose y los residuos nucleares aumenten, el problema de la durabilidad del hormigón sometido a radiación debe resolverse, así como el del hormigón retirado de centrales nucleares cerradas.

---

<sup>21</sup> Fuente: [4]



## Capítulo 2. Hormigón translúcido

### 2.1 Introducción, definiciones y limitaciones

El hormigón translúcido, yendo a la propia definición de la RAE, es aquel hormigón que deja pasar la luz a su través, pero no deja ver nítidamente los objetos. Esto indica el nivel de desarrollo que tienen estos hormigones, puesto que hoy en día, no existen hormigones transparentes.

Actualmente parecen existir dos corrientes, la primera trata de transmitir la luz a través del hormigón convencional mediante la adición de nuevos materiales como fibra de vidrio, trozos de vidrio o fibra óptica; la segunda corriente, trata de lograr la translucidez del hormigón sustituyendo todo o gran parte del conglomerante (cemento) por otro material conglomerante que además tenga la propiedad de ser translúcido. Podría citarse una tercera corriente válida en paneles o muros de pequeño espesor, y es la de sustituir el árido convencional por árido translúcido, generalmente por árido procedente de vidrio reciclado.

Los hormigones translúcidos poliméricos sustituyen todo o gran parte del conglomerante tradicional del hormigón, el cemento, por otro conglomerante que además sea translúcido, como pueden ser los materiales poliméricos: plástico, poliéster o resina. Este tipo de hormigón lo crearon en 2005, Joel Sosa Gutiérrez y Sergio Omar Galván Cáceres, dos estudiantes de Ingeniería Civil de la UAM en México, y crearon la empresa Concretos Translúcidos comercializando el producto aglutinante con el nombre de Ilum (aditivo). Se tiene así un aglutinante polimérico que reúne las características de los cementos tradicionales con la propiedad de ser translúcido.

El aditivo polimérico que hace de matriz o aglutinante epoxídico utilizado en la formulación de este hormigón, es el éter diglicidílico del bisfenol A (DGEBA), que es deshidratado en vacío a 80 °C durante 8 horas antes de su empleo. El endurecedor utilizado es dietilentriamina (DETA), que debe ser deshidratada sobre tamices moleculares antes de su empleo.

En Europa se empezó a comercializar en 2008, fundamentalmente en Hungría, en asociación con el arquitecto Áron Losonczy (inventor del hormigón con fibra óptica). El hormigón polimérico permitiría la transmisión de la luz en todas las direcciones y podría contener en su interior imágenes, luminarias y objetos. Teóricamente sería un 30% más ligero que el hormigón convencional y permitiría hasta un 80% del paso de la luz, con una resistencia igual o mayor al hormigón convencional. Sin embargo, con base en la revisión bibliográfica, no se tiene evidencia de que se hayan publicado documentos que indiquen la cantidad de luz que se puede llegar a transmitir ni cuáles son sus propiedades mecánicas o de durabilidad. Por este motivo, en este trabajo se incluye únicamente datos referentes al hormigón translúcido con fibra óptica del siguiente apartado.

Pese a que las características de este hormigón permitirían utilizarlo para construir edificios, su alto precio de hasta tres veces el de un hormigón convencional, hace que solo se fabrique en placas de hormigón con grava de colores vistosos, fáciles de transportar, para colocar en techos, paredes o mobiliario del hogar, por ejemplo encimeras (Figura 2.1). Se observa perfectamente el árido, lo que hay que tener en cuenta para que el resultado final sea estético, considerar el tipo de árido, color, tamaño etc. Así mismo, se podría prescindir del árido grueso y tener un hormigón más homogéneo como el que se ve en la Figura 2.2.

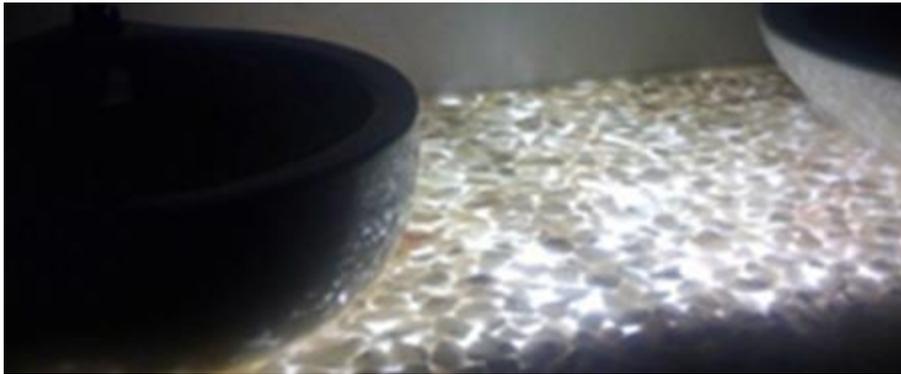


Figura 2.1 Encimera de hormigón translúcido con el aditivo Ilum.



Figura 2.2 Hormigón translúcido con aditivo Ilum y sin árido grueso.

## 2.2 Hormigón translúcido con fibra óptica

La idea de hormigón translúcido como concepto parece que surge del arquitecto Rem Koolhaas cuando lo plantea en su empresa OMA (Office for Metropolitan Architecture) y esa idea es recogida por Will Wittig y Bill Price ya en 1999 que realizaron algunos intentos mediante paneles con fibra de vidrio. No obstante, la invención del hormigón translucido se le atribuye a un joven arquitecto

danés en 2001, Áron Losonczy, durante sus estudios de posgrado en la Royal University College of Fine Arts de Estocolmo. Éste patenta y comercializa Litracon, cuyo significado es el de "Light Transmitting Concrete". Este hormigón consiste en un hormigón que incorpora filamentos de fibra óptica (vidrio o plástico) en la dirección que se quiere transmitir la luz, siendo el hormigón opaco en la dirección transversal. En teoría se puede transmitir la luz con pocas pérdidas hasta una distancia de 20 metros, pero a menor distancia mejor la pérdida es menor.

Actualmente hay dos marcas que comercializan este producto, Litracon y Lucon, aunque existen otras marcas comercializando productos similares como la italiana Italcementi Group con el producto i-Light. El hormigón fabricado por Lucon es un producto similar al de Litracon, que emplea en su fabricación una cantidad menor de fibras, pero más gruesas (0.4mm), disponiéndose encadenadas, dando como resultado líneas de luz. Lucon incorpora una nueva tipología de hormigón translucido con aislante térmico integrado para el empleo de perímetro de elementos estructurales, mantiene las características ópticas a ambos lados, situándose el aislante en medio a modo de panel sándwich.

### 2.2.1 Composición

El hormigón con fibra óptica incorpora a una mezcla de un micro hormigón con granulometría fina, alrededor de un 4% en volumen de fibra óptica con un diámetro variable de 2 a 200  $\mu\text{m}$ , lo que puede ser menor a un cabello humano (80  $\mu\text{m}$ ). Este hormigón se comporta como un único material homogéneo y únicamente se comercializa en piezas prefabricadas. A continuación, en la Tabla 2.1,

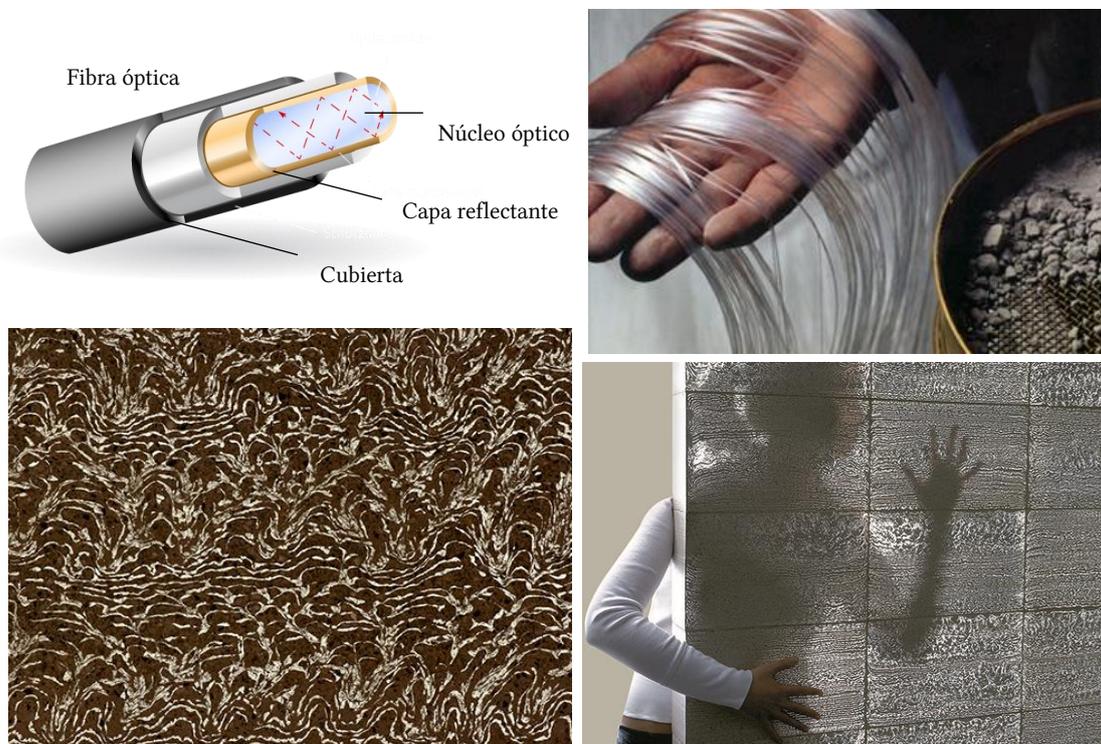


Figura 2.3 Hormigón con fibra óptica Litracon.

se ofrecen los datos relativos al producto prefabricado de Litracon que se encuentra en su página web.

Tabla 2.1 Especificaciones de bloques translúcidos Litracon.<sup>23</sup>

Propiedad	Hormigón Litracon
Tipo de producto	Bloques prefabricados
Composición	96% hormigón, 4% fibra óptica (vidrio)
Densidad	2100-2400 Kg/m <sup>3</sup>
Tamaño máximo del bloque	1200mm × 400mm
Espesor	25mm-500
Color	Gris, blanco o negro
Distribución de fibras	Orgánica
Terminación	Pulido
Resistencia a compresión	50 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a tracción	7 N/mm <sup>2</sup>

## 2.2.2 Características físico-mecánicas

En cuanto a las propiedades mecánicas, diversos estudios han demostrado que a mayor porcentaje de fibra óptica la transmisión de luz es mayor pero las propiedades mecánicas y durabilidad del hormigón disminuyen. En la Figura 2.4<sup>24</sup> se muestra la variación del porcentaje de luz transmitido y la resistencia a compresión a 28 días con respecto a la variación en el porcentaje de fibra óptica adicionada, a partir de los resultados obtenidos por Mohamed N (Figura 2.4 (a) con a/c de 0.45 y Figura 2.4 (b) con a/c de 0.5) y Zhi Zhou (Figura 2.4 (c) con a/c de 0.44).

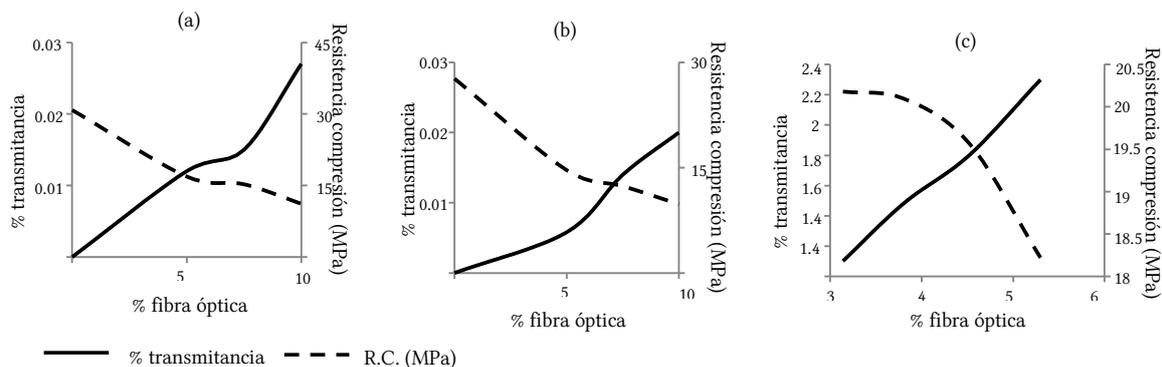


Figura 2.4 Variación del porcentaje de luz transmitida y resistencia a la compresión con respecto al porcentaje de fibra óptica adicionada. Datos de Mohamed N ((a) y (b)) y Zhi Zhou (c).

<sup>23</sup> Fuente: (<http://www.litracon.hu/en>, s. f.)

<sup>24</sup> Fuente: [25]

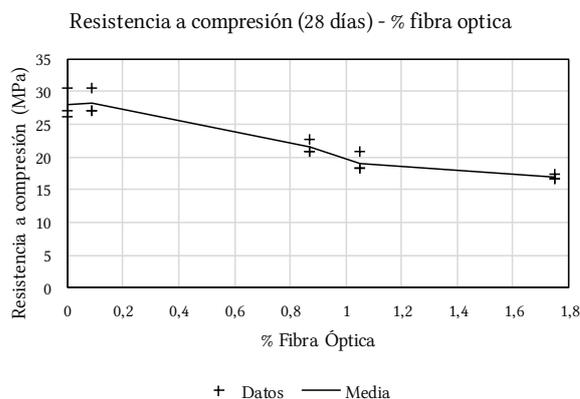
Así mismo, la muestra los datos del último ensayo con probetas cubicas de 100 mm de lado.

**Tabla 2.2 Pérdida de resistencia en relación a la cantidad de fibra óptica adicionada.**

Fibra óptica (%)	0.0	3.14	3.80	4.52
Carga (kN)	201.8	201.0	195.7	182.2
Resistencia (MPa)	20.18	20.10	19.57	18.22
Pérdida (%)	0.0	0.39	3.02	9.71

Por otro lado, el estudio realizado por [26] obtiene unas pérdidas mayores en relación con la fibra óptica adicionada y, además, obtiene un porcentaje de 0.087% de fibra óptica para el cual la resistencia a compresión sufre un ligero incremento. La Figura 2.5 muestra los datos de los resultados obtenidos por (A. Karandikar et al.).

Se observa, en comparación con los ensayos anteriores, que la pérdida obtenida es considerablemente mayor para un porcentaje de fibra óptica menor, obteniéndose hasta un 40% de pérdida de resistencia a compresión con un 1.75% en volumen de fibra óptica adicionada. Esta diferencia es posible que tenga como principal causa las diferentes dimensiones empleadas en las probetas, en todo caso, en la se dan las dimensiones y dosificación empleadas por los autores de cada ensayo. Otro posible factor puede ser el tipo de fibra óptica empleada, fundamentalmente el diámetro que puede ser variable.



**Tabla 2.3 Datos del ensayo.**

F.O.(%)	R.C. (MPa)	Pérdida (%)
0	27,904	0
0,09	28,1946	-1.0
0,87	21,5093	22.9
1,05	18,8933	32.3
1,75	16,8587	39.6

**Figura 2.5 Resultados obtenidos por A. Karandikar.**

**Tabla 2.4 Dimensiones y dosificación de las probetas empleadas por distintos autores.**

	Zhou et al. 2009	Karandikar et al. 2015
Dimensiones probeta (mm)	100×100	75×75
Cemento portland (kg)	450	490
Agua (kg)	200 (a/c=0.44)	220 (a/c=0.45)
Arena (kg)	900	1.489

En los ensayos realizados no se describen las características de la fibra óptica empleada, sin embargo, el estudio realizado por [27] muestra que, para un porcentaje de fibra óptica determinada,

a mayor diámetro de la fibra óptica la resistencia del hormigón aumenta de manera casi lineal, por lo que es un factor a tener en cuenta a la hora de comparar resultados.

Los principales tipos de fibra óptica que se pueden encontrar en el mercado se muestran en la siguiente figura (Figura 2.6), en la que se distingue fundamentalmente entre fibras monomodo y multimodo. Las fibras multimodo son capaces de transmitir varios haces de luz, son más baratas, más sencillas de instalar para usos convencionales de telecomunicaciones y tienen un núcleo más grueso pudiendo ser el cable final igual o más grueso que uno monomodo.

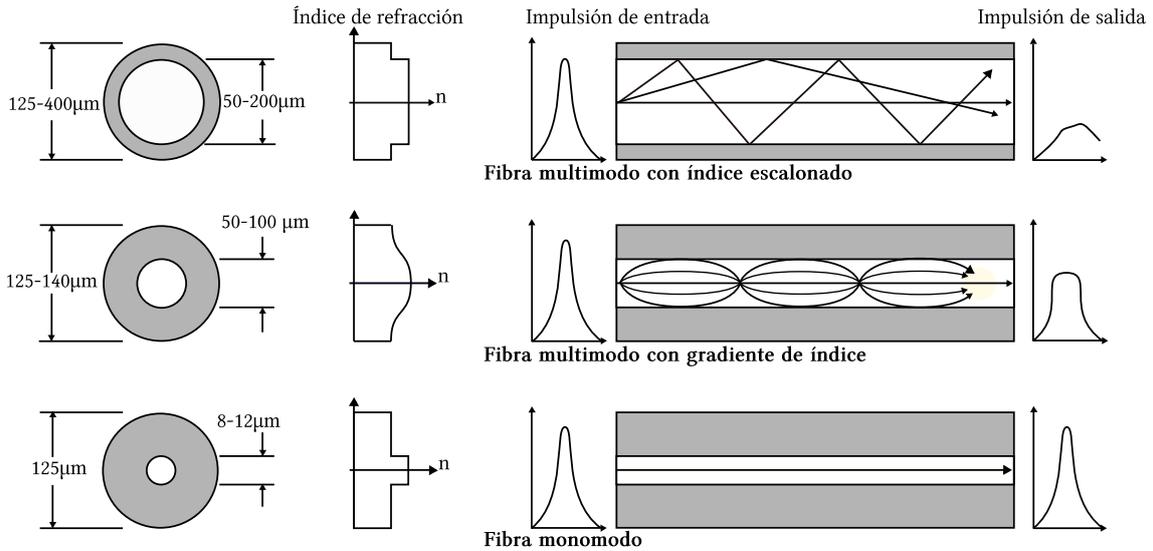


Figura 2.6 Tipos de fibra óptica existentes y su modo de funcionamiento.

Por las dimensiones de la fibra óptica (0.4 mm) que emplea la empresa Luccon en la fabricación de su hormigón translúcido, así como ser más barata, se deduce que la fibra óptica que se emplea en el hormigón es una fibra óptica multimodo, aunque el estudio realizado por [28] empleó fibra monomodo sin recubrimiento.

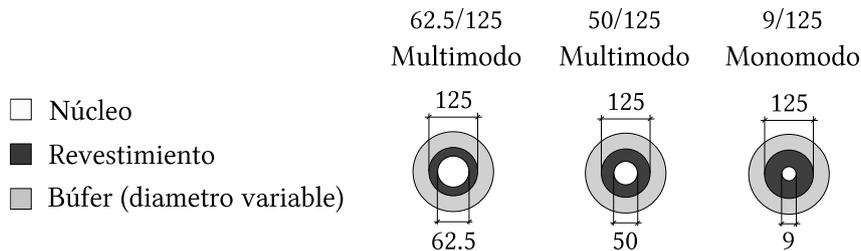


Figura 2.7 Nomenclatura de los principales tipos de fibra óptica.

Todos los estudios anteriores muestran que a medida que se aumenta el porcentaje de fibra óptica adicionada la transmisión de luz aumenta y la resistencia a compresión disminuye. Esto se debe a que la fibra óptica no aporta ninguna resistencia en conjunción con el hormigón y a medida que se aumenta su cantidad se reduce la cantidad de cemento relativo, disminuyendo así la resistencia a compresión. La transmisión de la luz, por otro lado, no depende de la longitud de onda

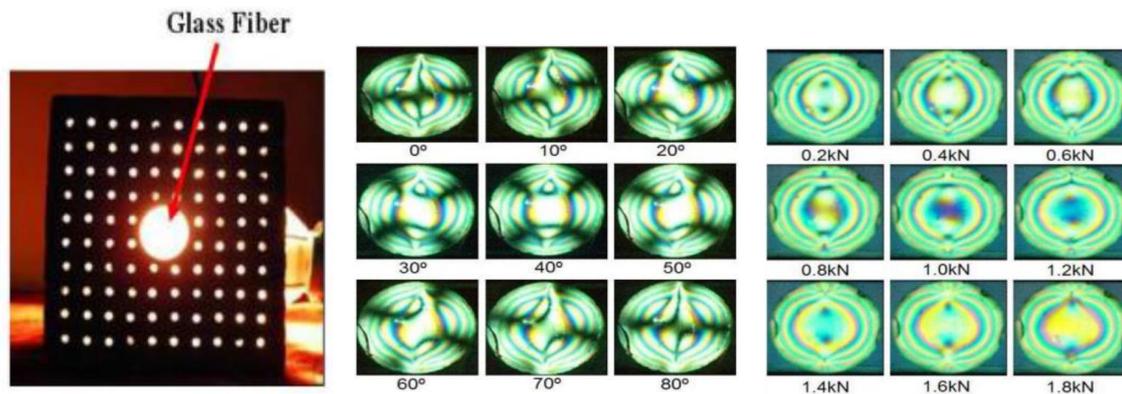


Figura 2.8 Aplicación de la fotoelasticidad en fibra de vidrio de gran diámetro.

según el estudio de [29] y [30], es decir, la transmisión de luz se mantiene constante independientemente de la longitud de onda y sólo depende del porcentaje en volumen de fibra óptica. Esto permite deducir que la fibra óptica no solo ofrece la posibilidad de transmitir el espectro de luz visible, sino que también es eficaz transmitiendo la energía térmica, por lo que puede ofrecer una reducción del consumo energético también en ese sentido. En cuanto a la cantidad de luz transmitida no es posible dar una referencia pues no se puede hacer una comparación entre diferentes estudios debido a las características diversas de las muestras empleadas. Para ello, sería recomendable establecer una característica propia de cada material como el coeficiente de extinción molar que determina cuánta energía pierde un haz de luz cuando atraviesa un sólido y es independiente del espesor del material.

Por otro lado, algunos autores [29] han demostrado que la fibra de vidrio de gran diámetro puede emplearse en el hormigón translúcido para medir las tensiones en el hormigón mediante la fotoelasticidad. La fibra de vidrio que emplean para ello es de 15 mm, la cual, bajo condiciones normales actúa como un material isotrópico pero que, bajo la acción de una carga, se vuelve anisótropo y adquiere la propiedad de birrefringencia (birrefringencia accidental), es decir, presenta dos índices de refracción. Esto permite que ante el paso de una luz polarizada se puedan determinar las tensiones en dicho material mediante la fotoelasticidad (Figura 2.8<sup>25</sup>) y obtener las isóclinas (líneas oscuras) e isocromáticas (líneas de igual color).

La fibra óptica con rejilla de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) ha demostrado en el estudio realizado por [30] que tiene un buen ajuste de las deformaciones medidas respecto a las tradicionales galgas extensométricas, con la ventaja de que se pueden introducir dentro del hormigón junto con la fibra óptica convencional y tener más datos del comportamiento en el hormigón. Este tipo de fibra FBG, presenta en su interior una variación periódica del índice de refracción, en una longitud de pocos mm, lo que hace de filtro de las longitudes de onda que circulan en su interior, dejando pasar unas longitudes de onda determinadas y reflejando las otras, a modo de un espejo dieléctrico. La FBG ha sido estudiada en diversas investigaciones resultando ser apta para el control y medición de las tensiones y deformaciones dentro de otros materiales como el hormigón o materiales compuestos [31].

<sup>25</sup> Fuente: [28]

### 2.2.3 Aplicaciones

Actualmente, el hormigón translúcido que se ha empleado ha sido únicamente el compuesto por fibras que tienen la capacidad de transmitir la luz. No se puede afirmar que este material haya tenido unas aplicaciones relevantes en el sector de la construcción, aunque dentro de la arquitectura y siempre con motivos estéticos, sí ha logrado algunas aplicaciones interesantes que le han valido algunos reconocimientos. Sin embargo, Quizá la empresa que tiene las construcciones más destacables sea Litracon debido a que fue la pionera en el desarrollo del hormigón translúcido.

#### Pabellón para fumadores en Zurich, 2013

Uno de los ejemplos más destacables del hormigón translúcido es el pabellón para fumadores situado dentro de un jardín de una casa privada en Zurich, la cual ganó el Wallpaper Design Award en 2015. Es una estancia de 8 m<sup>2</sup> construida con cinco paneles prefabricados de hormigón translúcido y reforzado con acero inoxidable. Es la primera estructura autoportante de hormigón translúcido y en lugar de fibra óptica se emplearon cordones de un plástico acrílico, PMMA, dispuestos como una malla cuadrangular. El diseño es del arquitecto Gianni Botsford y fue desarrollado por la colaboración de Tall Engineers, Litracon y Hammerlein junto con Gianni Botsford Architects. El presupuesto final fue de 65000£.



Figura 2.9 Pabellón para fumadores en Zurich, diseñado por Gianni Botsford.

#### Smart Lane Separator

Debido a las buenas propiedades de la fibra óptica para transmitir la luz, [33] han desarrollado un dispositivo de hormigón translúcido mediante fibra óptica de plástico que, incrustado en el firme de carretera, es capaz de transmitir información de manera bidireccional, lo han denominado delimitador de carril inteligente (Smart Lane Separator, SLS). El objetivo sería poder indicar información a los usuarios de la vía mediante la emisión de señales luminosas y recibir información del estado de la vía. Este dispositivo serviría tanto para firmes rígidos como flexibles, de nueva construcción o existentes y contaría con un 3% en volumen de fibra óptica, que según los ensayos resultaría en una pérdida de resistencia del 11% respecto al mismo hormigón sin fibra óptica. Esta fibra se dispondría en cordones de 12 núcleos.

El dispositivo ha cumplido los criterios de resistencia, con una resistencia a compresión mínima de 35 MPa, cumple también con los valores adecuados del valor del coeficiente de resistencia al deslizamiento y la fibra óptica soporta perfectamente las altas temperaturas. El SLS ha sido diseñado con vistas a su utilización en las carreteras de Arabia Saudí, como parte de un plan nacional para la mejora de la seguridad y desarrollo de sistemas de transportes inteligentes. Su utilización sería útil para saber cuándo una carretera ha quedado bloqueada por la arena del desierto, ya que la fibra óptica detectaría la presencia de una carga sostenida en el tiempo.

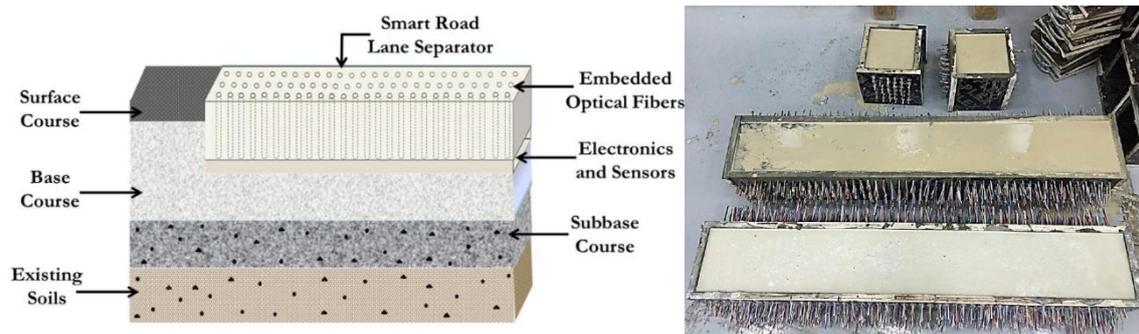


Figura 2.10

## 2.2.4 Conclusiones

Entre las características que se pueden obtener en un hormigón translúcido o ventajas y desventajas se pueden citar las siguientes:

- La propiedad de un muro para transmitir la luz, conlleva que durante el día una casa utilice menos energía para la iluminación.
- Tiene buenas propiedades arquitectónicas para utilizarse en las construcciones con fines estéticos.
- Si la luz no puede llegar adecuadamente a algún lugar se puede emplear el hormigón translúcido.
- Puede proporcionar cierto alivio en edificios que por accidentes hayan sufrido un corte de luz durante el día y tengan que ser desalojados.
- La transmisión de luz es proporcional al porcentaje de fibra óptica adicionada, a costa de perder cierta resistencia en el hormigón, que habría que estudiar en cada caso para la dosificación empleada.
- Alto coste debido fundamentalmente al coste de la fibra óptica pero también a la mano de obra especializada que se necesita. No se puede precisar el coste del metro cúbico de hormigón, aunque algunas fuentes [32] estiman un precio del metro cúbico hasta 5 veces mayor.
- La inclusión de armadura en el hormigón sería un perjuicio en el aspecto estético del hormigón, en todo caso sería un factor a tener en cuenta a la hora de diseñar.
- No existe la posibilidad de fabricarlo en obra, necesariamente se suministra mediante piezas prefabricadas.

## 2.3 Hormigón translúcido fotocatalítico

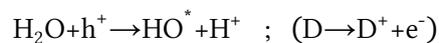
La denominación hormigón translúcido abarcaría también aquellos hormigones que sustituyendo el árido convencional por árido translúcido, generalmente vidrio, consiguen transmitir la luz a su través. Esto suele ser válido solamente en paneles o muros de relativamente pequeño espesor puesto que el árido debe conectar los paramentos a los que se desea transmitir la luz.

El concepto del uso del vidrio como material estructural es bastante antiguo y ya lo utilizó G. Falconnier a finales del siglo XIX. Más recientemente se han realizado estudios referentes al hormigón con sustitución de áridos por vidrio reciclado como una solución estética, estructural y medioambientalmente viable. Sin embargo, más interesante es aún el hormigón translúcido fotocatalítico, que aprovecha el contenido de vidrio reciclado para mejorar sus propiedades de oxidación fotocatalítica (OFC) de partículas contaminantes en el aire como el NO y NO<sub>2</sub>.

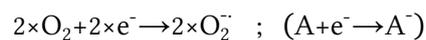
La propiedad de OFC del hormigón se logra mediante la adición de TiO<sub>2</sub> a la mezcla, el cual se ha demostrado que funciona bien en hormigón expuesto al ambiente externo. Este TiO<sub>2</sub> se puede añadir mediante diferentes productos que existen en el mercado, por ejemplo los que emplean [34]: Aerodisp W 740 X que es una solución acuosa de TiO<sub>2</sub> ahumado hidrófilo y Krono Clean 7404, un TiO<sub>2</sub> dopado con carbono en forma de lechada. También se puede emplear los minerales de anatasa y rutilo o el denominado P-25 de Degussa que es un polvo de anatasa y rutilo con una proporción de 3:1.

### 2.3.1 Fotocatálisis

El mineral de anatasa, una de las cinco formas de TiO<sub>2</sub>, es capaz de degradar ciertos contaminantes atmosféricos, como NO<sub>x</sub> o compuestos orgánicos volátiles, en presencia de luz natural. Esto se produce debido a una reacción de tipo redox en la superficie que depende, entre otros, del propio potencial redox, energía e intensidad de radiación recibidas por el fotocatalítico y superficie accesible del fotocatalítico al agua, oxígeno y contaminantes. La reacción se desencadena cuando, debido a la energía electromagnética recibida, un electrón se desplaza de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un hueco positivo (h<sup>+</sup>) en la banda de valencia y un electrón negativo (e<sup>-</sup>) en la banda de conducción. El hueco dejado oxida rápidamente las sustancias adsorbidas por el fotocatalítico.



Así mismo, el electrón participa en reacciones de reducción, que entre las más comunes se produce:



Para que las reacciones de oxidación y reducción puedan dar lugar en la superficie del fotocatalizador, las condiciones de transferencia energética han de ser favorables. Es decir, en la oxidación el donante tiene un potencial  $E$  mayor que en el borde de la banda de valencia  $y$ , en la reducción el potencial  $E$  es menor que el borde de la banda de conducción. Para que se produzca una fotoca-

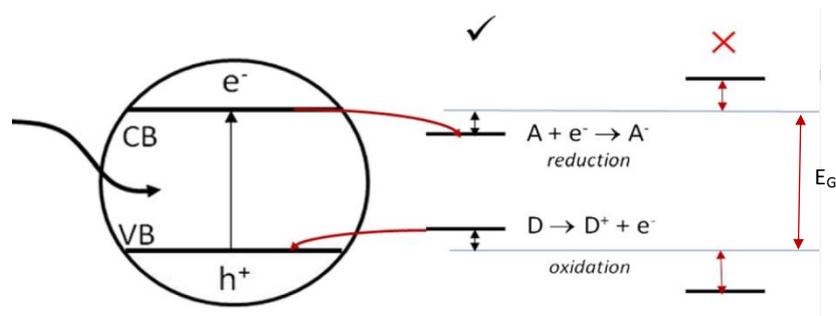


Figura 2.11 El proceso fotocatalítico debe ser energéticamente favorable.

tálisis sostenible se deben dar ambas condiciones (Figura 2.11[35]).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la presencia de radiación solar es imprescindible para que se desencadena la reacción de fotocatalisis entre el  $\text{TiO}_2$  y los compuestos contaminantes. La  $E_G$  es el hueco entre bandas definido como el intervalo de energía entre la banda de valencia (VB) y la banda de conducción (CB) del fotocatalítico, que para el caso de la anatasa es de 3.2 eV. Consecuentemente, para que se desencadene la reacción, se requiere una energía  $\geq 3.2$  eV, la cual, en la superficie terrestre está en el rango de 3-5% del total de la radiación solar. Por tanto, la eficacia de la fotocatalisis está influenciada por la geografía, siendo las latitudes más próximas al ecuador más idóneas para lograr dichos índices de radiación. [35] han realizado una modelización de dicha radiación y han determinado que solo las latitudes inferiores a 35 mantienen al mediodía (condiciones ideales) al menos un 3% de esta radiación durante todo el año. En un ensayo realizado en Copenhage (55.68°N) se observó que solamente se tenía una oxidación significativa de NO cuando la intensidad UV era superior a  $600 \text{ kJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en aquel lugar, es decir que otro lugar con una concentración de contaminantes diferente podría tener otro valor.

Además del potencial redox y la energía solar necesarias, en el proceso fotocatalítico intervienen otros factores como la superficie específica del fotocatalítico y el pH de la superficie donde ocurre la reacción. La superficie específica debe ser maximizada para un efecto eficaz del fotocatalítico teniendo en cuenta una óptima dispersión de las partículas, ya que, la aglomeración de partículas puede obstruir el acceso de una partícula contaminante a la superficie. Así mismo, el pH influye en el tipo y eficiencia de la adsorción, ya que, con un pH más elevado la superficie del fotocatalítico se carga negativamente ( $\text{TiO}^-$ ) lo que provoca que los iones  $\text{Ca}^{2+}$  se asocien fuertemente a la superficie de las partículas induciendo una reversión de la carga (potencial positivo). De esta manera, se produce una repulsión entre las partículas del fotocatalítico y la dispersión mejora. La práctica de dopar el  $\text{TiO}_2$  con otros elementos (tungsteno o niobio) tiene su fundamento también en dicho concepto, ya que lo que se pretende es disminuir el pH del punto isoeléctrico (para el cual la carga y el potencial  $\zeta$  son cero) de la superficie de  $\text{TiO}_2$  y así lograr un mayor potencial  $\zeta$ .

El pH del hormigón fresco generalmente es superior a 13, lo que favorece la dispersión de las partículas de  $\text{TiO}_2$  tal y como se acaba de mencionar. Sin embargo, las condiciones del pH pueden

variar rápidamente en la superficie del hormigón una vez retirado el encofrado, ya que, la fase acuosa y alcalina experimenta una reacción con el  $\text{CO}_2$  atmosférico reduciendo el pH y pudiendo inducir una deposición de calcita, lo que puede obstruir las partículas del fotocatalítico.

### 2.3.2 Reacción álcali-sílice

Uno de los principales inconvenientes en la adición de vidrio al hormigón es la reacción álcali-árido (RAA) o reacción álcali-sílice (RAS), la cual genera productos expansivos. Estas son reacciones que se deben tener en cuenta en el hormigón convencional, pero más aún cuando se incorpora árido procedente de vidrio reciclado y, por ello, se han realizado numerosos estudios conducentes a investigar las consecuencias que esto tiene.

El daño por RAS es un proceso largo en el que se producen diferentes etapas, primero los álcalis (sodio y potasio) presentes en el cemento reaccionan con el agua produciendo hidróxidos de sodio y potasio. Después, la sílice reactiva presente en el vidrio se disuelve lentamente en la solución alcalina de los poros. Consecuentemente, la sílice disuelta reacciona con los hidróxidos de álcalis, produciendo un gel álcali-sílice viscoso e inestable que es capaz de absorber agua y expandirse. Por tanto, el exceso de agua contribuye a la expansión, generando mayores tensiones internas y provocando el deterioro prematuro del hormigón.

Por otro lado, la RAS es un fenómeno que depende del tamaño del árido, produciéndose de manera más acentuada en áridos gruesos y en menor medida en los finos [34],[36],[37]. Incluso, se ha demostrado [38], que con vidrio molido con un tamaño de partícula de  $38\ \mu\text{m}$  se tiene un comportamiento puzolánico [36] mejor que con la ceniza volante, es decir, que hay una mayor actividad del vidrio con la cal, una mayor resistencia a compresión y una menor expansión. Esto se traduce en que el filler procedente del vidrio puede ser una alternativa viable como sustituto parcial de hasta el 30% del cemento en el hormigón, lo que puede constituir un beneficio medioambiental tanto por el hecho de utilizar vidrio reciclado como la de reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la producción de cemento.

La Figura 2.12 [39] muestra precisamente lo anteriormente descrito, donde se ha realizado un ensayo sobre la expansividad de cuatro muestras de hormigón con partículas de vidrio de diferentes

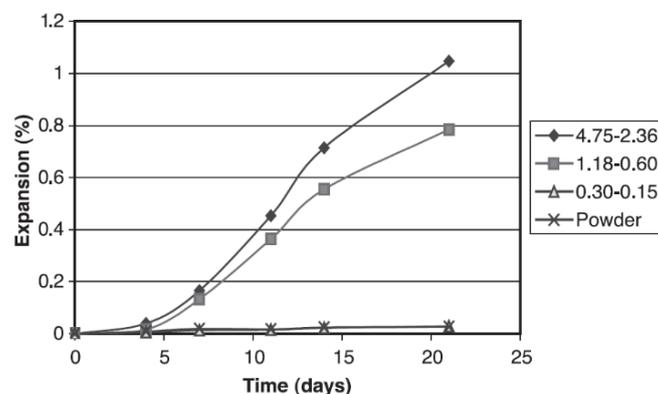
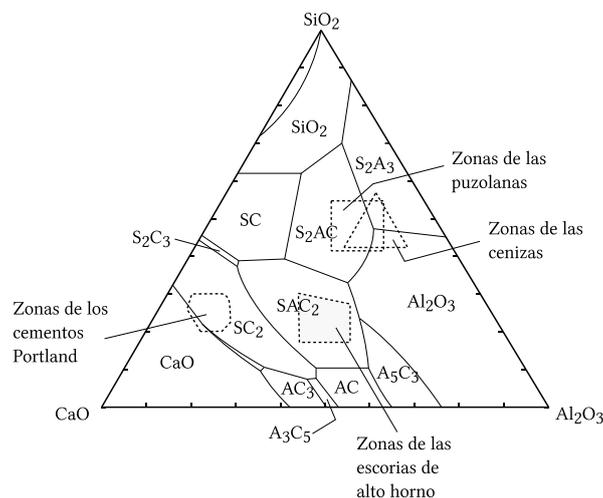


Figura 2.12 Curvas de expansión para diferentes diámetros de las partículas de vidrio.

diámetros. Se observa que para tamaños de partículas de hasta 0.30 mm no se produce una expansión perjudicial en el hormigón, mientras que para tamaños superiores a 0.60 mm la expansión es significativa.

Sin embargo, si lo que se desea lograr es un hormigón translúcido mediante la adición de vidrio, estas partículas han de ser de un tamaño lo suficientemente grande como para transmitir la luz a través del hormigón. De modo que se enfrentaría de nuevo el problema de la RAS, para ello, además de utilizar cementos con un bajo contenido de álcalis, es recomendable utilizar también materiales puzolánicos. Las puzolanas se caracterizan por un alto contenido de sílice, así como una alta superficie específica y contribuyen a disminuir el efecto del RAS. Como una definición más general se puede citar la que ofrece la norma ASTM 618:

Las puzolanas son aquellos materiales sílico o silicoaluminos que por sí solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido cálcico  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandita) a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes.



**Figura 2.13 Diagrama triangular sílice-alúmina-cal. Situación de los cementos Portland, puzolanas, cenizas y escorias.**

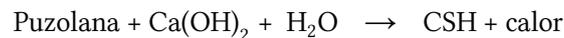
Así mismo, es muy aclaratoria la definición que da Joaquín Díez-Cascón: los materiales con propiedades puzolánicas tales como escorias o cenizas volantes tienen similares componentes (Figura 2.13 [21], <sup>26</sup>) que los cementos, pero en distintas proporciones, lo que les confiere características diferenciales y conlleva distintos procesos de hidratación y endurecimiento en su mezcla con los cementos.

<sup>26</sup> Fuente: Joaquín Díez-Cascón Sagrado

**Tabla 2.5 Composición de cemento Portland y ceniza volante.**

Óxidos	Cemento Portland I/45 (%)	CV (%) (Antracita)
SiO <sub>2</sub>	18.27	48.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.83	25.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.58	9.09
CaO	64.19	4.15
MgO	1.79	0.91
Na <sub>2</sub> O	0.35	1.78
K <sub>2</sub> O	0.80	2.36
SO <sub>3</sub>	3.19	1.65
P.C.	3.38	4.65

Cuando se realiza una mezcla de cemento Portland con ceniza volante (CV) se produce una reacción en la que intervienen la cal y los álcalis liberados en la hidratación del cemento Portland y por otra los óxidos (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO<sub>3</sub>) de la puzolana, modificándose los mecanismos de hidratación de los compuestos principales del cemento, disminuyendo el calor generado, contenido de portlandita, cantidad de agua combinada y grado de reacción de los componentes. La portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) constituye de un 20 a un 25% del contenido sólido, el segundo producto más abundante en la pasta de cemento hidratado, no aporta ningún beneficio en la capacidad mecánica y puede incrementar los espacios porosos al lixiviarse.



El principal producto de la reacción es la fase CSH (silicato de calcio hidratado), similar al producto en la reacción del agua con el cemento Portland y que contribuye a la generación de capacidades mecánicas, especialmente a edades avanzadas de hidratación. Parte de los álcalis que participan en la reacción, y que fueron liberados en la reacción de hidratación, quedan adsorbidos en la estructura de los CSH, lo que también contribuye a disminuir una posible reacción del árido en el hormigón.

Por tanto, es totalmente recomendable la utilización de material puzolánico para evitar daños por RAS en el hormigón, ya que con dicha sustitución se gana resistencia a compresión para edades avanzadas (90 días) [40], [41], se reduce la necesidad de agua y se reduce la cantidad y efecto de los álcalis y portlandita contenidos en el cemento Portland [23]. Sería recomendable aportar a la mezcla alrededor de una 30% de material puzolánico, idealmente ceniza volante, con el fin de que no se produzcan problemas por expansión debido a la RAS. Esto depende de en qué medida y de qué forma se emplea el vidrio en la mezcla, pero para las dosificaciones dadas en la (muestras 7-9) lo adecuado sería el porcentaje de 30% de material puzolánico [34]. También se recomienda [42] que la cantidad de árido de vidrio empleada no supere el 50% del total del árido, precisamente para evitar el riesgo de daño por RAS.

### 2.3.3 Características físico-mecánicas

La utilización de árido procedente de vidrio reciclado implica realizar un proceso de lavado del árido, puesto que las partículas contaminantes presentes en el vidrio no lavado suponen un gran detrimento de las propiedades mecánicas en el hormigón, y disminuye la trabajabilidad del hormigón, requiriendo un mayor contenido de agua para conseguir la consistencia adecuada [34]. Respecto al árido lavado, un hormigón con árido no lavado e igual consistencia sufre hasta un 240% de reducción en la resistencia a compresión a los 28 días (). Referente a los hormigones fotocatalíticos con vidrio reciclado, en [34] se han realizado ensayos para determinar la influencia de la utilización de áridos de vidrio no lavado (muestras 1-5 en Tabla 2.6) y la sustitución total o parcial (muestras 3-5) de los áridos convencionales de una muestra de referencia de hormigón convencional.

**Tabla 2.7 Características de las muestras de hormigón autocompactante con vidrio.**

Muestra	Total material cementante (kg/m <sup>3</sup> )	Agua	a/c	Contenido de vidrio total (% vol.)	Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	Eficiencia de los cementantes [MPa/(kg/m <sup>3</sup> )]
Ref.	460	180	0.39	0.00	60.6	0.132
1	460	252	0.55	55.60	21.8	0.047
2	360	342	0.95	51.15	12.6	0.035
3	460	180	0.39	28.20	40.7	0.088
4	460	180	0.39	10.10	44.7	0.097
5	460	180	0.39	30.70	46.1	0.100
6	505	200	0.40	60.50	32.1	0.064
7	500	182	0.36	56.90	45.0	0.090
8	500	182	0.36	56.60	42.1	0.084
9	551	182	0.33	56.10	41.6	0.075

Las muestras 1 y 2 sustituyen completamente los áridos convencionales, pero la muestra 2 contiene mayor cantidad de agua con el objeto de lograr una adecuada consistencia debido a que la

**Tabla 2.6 Dosificaciones de los hormigones autocompactantes.**

Muestra	Dosificación de las muestras (kg/m <sup>3</sup> )										
	Agua	Materiales Cementantes			Áridos y filler			Áridos y filler de vidrio			
		CEM I 52.5 N	CV <sup>27</sup>	EAH <sup>28</sup>	Filler calizo	Arena 0-2 mm	Grava 2-8 mm	Filler de vidrio	0-1 mm	0-3 mm	0-8 mm
Ref.	180	360	100	-	115	813	735	-	-	-	-
1	252	360	100	-	-	-	-	99	265	106	782
2	342	360	-	-	-	-	-	287	83	82	828
3	180	360	100	-	111	813	-	-	-	-	708
4	180	360	100	-	-	663	732	252	-	-	-
5	180	360	100	-	111	-	740	-	664	104	-
6	200	400	-	105	-	-	-	-	458	186	-
7	182	400	-	100	150	-	-	-	285	332	-
8	182	400	30	70	150	-	-	-	285	328	-
9	182	400	-	151	102	-	-	-	320	297	568

<sup>27</sup> Cenizas Volantes.

<sup>28</sup> Escorias de Alto Horno, en el caso del ensayo mencionado son blancas para cuidar la estética final de la pieza.

contaminación del vidrio no lavado reduce notablemente la trabajabilidad del hormigón, aun usando un 2% de superplastificante.

Las mezclas 3-5 sustituyen un único tamaño de uno de los áridos convencionales por un árido de vidrio no lavado equivalente en tamaño. En todos los casos se ha utilizado una granulometría ajustada para minimizar el contenido de huecos de acuerdo a la curva modificada de Andreasen & Andersen (A&A) con un módulo de distribución de 0.23. Se observa que la sustitución de las granulometrías más finas (filler y arena) tiene una reducción ligeramente menor en la resistencia a compresión (25%) que con la sustitución de los tamaños de grava (2-8 mm) (30%). Se concluye que incluso con la sustitución parcial de uno de los tamaños de áridos convencionales la utilización de árido de vidrio no lavado supone un perjuicio en la resistencia del hormigón.

Las muestras realizadas y denominadas con números de 6-9 están realizadas con el objetivo de lograr un hormigón autocompactante con un alto contenido de vidrio para mejorar la translucidez, obtener buenas características mecánicas y no tener daños por RAS, además de un color blanco por razones estéticas. Para ello se emplean áridos lavados y secados, dosificaciones más altas de cemento y escorias de alto horno (EAH).

La eficiencia de los materiales cementantes es el cociente de la resistencia a compresión a 28 días entre la cantidad total de material cementante (CEM I, CV, EAH), y es una medida de la influencia del vidrio reciclado en el hormigón. Se observa que las mezclas con alrededor del 60% de vidrio lavado tiene unas eficiencias de los cementantes similares a las mezclas con solo el 10-30% de vidrio no lavado. Además, se puede ver que en la muestra 4, con solo un 10% de contenido de vidrio, tiene una eficiencia similar a las muestras 3 y 5 con un contenido de vidrio de aproximadamente 30%, de lo que se desprende que la sustitución del filler convencional por filler de vidrio no lavado supone un perjuicio mayor que el de la sustitución de los áridos más gruesos (arenas y gravas).

La Figura 2.14 muestra la evolución de la resistencia a compresión a lo largo de 28 días para las diferentes muestras realizadas, se aprecia que en la mezcla 6 se obtienen resistencias menores en comparación con el resto de muestras con áridos de vidrio lavado, debido a que no contiene filler calizo ni de vidrio, lo que produce un empaquetamiento de los áridos menor con mayor índice de huecos y menor resistencia.

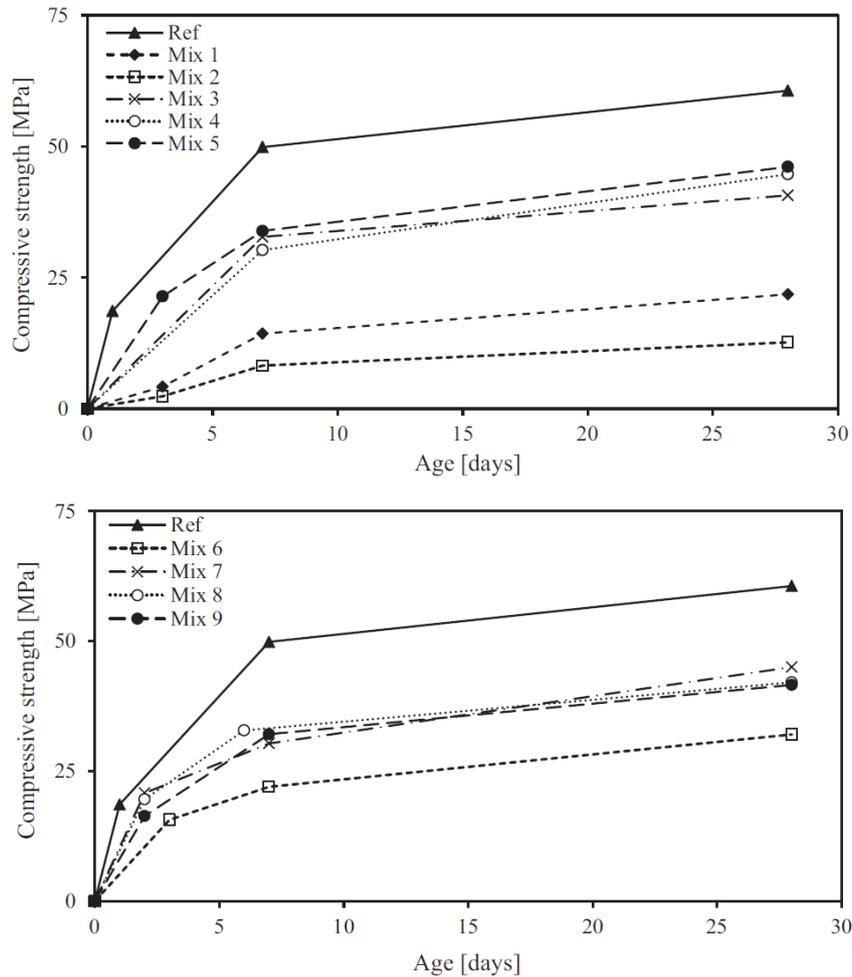


Figura 2.14 Resistencia a compresión en las muestras realizadas

### 2.3.4 Conclusiones

Siendo el objetivo lograr un hormigón translúcido fotocatalítico con buena resistencia y sin problemas de expansividad, las mezclas denominadas como 8 y 9 (Tabla 2.6) en la son las adecuadas para ello. No así la mezcla 7 que con un menor contenido de escorias (10% menor a la mezcla 9) y sin cenizas volantes, a diferencia de la mezcla 8, la expansividad resulta un 30% mayor a la mezcla 8 y un 50% a la mezcla 9. La cantidad que se recomienda de  $\text{TiO}_2$  es de 3%, puesto que no se han observado mejoras de oxidación fotocatalítica con un porcentaje mayor [34].

La máxima translucidez se logra con la mezcla 9, con mayor cantidad de árido de vidrio grueso, siendo mayor a medida que se reduce el espesor, como muestra se puede observar la Figura 2.15. Para la mezcla 9 se puede decir que la translucidez de una losa de 10 mm es comparable a una losa de 5 mm realizada con la mezcla 8.

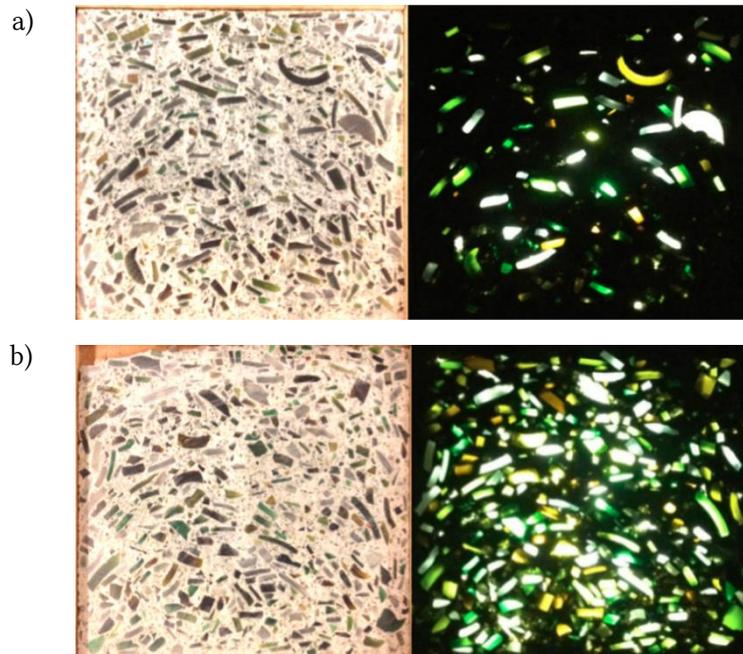


Figura 2.15 Losas realizadas con la mezcla 9 con espesores de 8 mm (a) y 4 mm (b).

Las ideas generales que se pueden extraer del estudio de este tipo de hormigón se resumen a continuación.

- El árido de vidrio no lavado disminuye notablemente la resistencia a compresión y la trabajabilidad del hormigón en comparación con el árido de vidrio lavado.
- Las partículas de vidrio expuestas a la luz contribuyen a una mejor activación del fotocatalítico  $\text{TiO}_2$ , lo que se traduce en una oxidación fotocatalítica más eficiente de las partículas contaminantes.
- La rugosidad superficial del hormigón contribuye a una mejor activación del fotocatalítico, siendo más efectiva la utilización de  $\text{TiO}_2$  [42].
- La translucidez de una losa de hormigón depende del tamaño máximo del árido de vidrio junto con el espesor de la losa, siendo necesario que el tamaño máximo sea siempre mayor al espesor de la losa.
- La reacción álcali-sílice (RAS) como consecuencia del árido de vidrio se puede evitar en el hormigón mediante la adición de material puzolánico como la ceniza volante, en una cantidad que depende del tipo de mezcla y cantidad de vidrio empleado, aunque se puede estimar en un 30%.
- A pesar de las buenas resistencias mostradas, es dudosa la aplicación como elemento estructural, puesto que no se ha estudiado su viabilidad junto con armadura de acero y las losas fabricadas son de espesores muy reducidos, limitados por el tamaño máximo del árido de vidrio empleado.

## Capítulo 3. Hormigón ligero

### 3.1 Introducción, definiciones y limitaciones

#### 3.1.1 Introducción

Los primeros vestigios de utilización de hormigón con áridos ligeros se pueden remontar al 3000 a.C., cuando se construyeron las famosas ciudades de Mohenjo-Daro y Harappa por la civilización del valle del Indo. En Europa se encuentran ejemplos claros de la utilización de árido ligero como la piedra pómez durante la época del Imperio Romano. Un ejemplo es la cúpula del Panteón de Roma (118-128 d.C.), donde para disminuir el peso de la cúpula, modificaron la mezcla de hormigón reduciendo su densidad según se asciende en la cúpula, mediante la incorporación de árido de piedra pómez. Sin embargo, la utilización del árido ligero solamente se podía producir en regiones con actividad volcánica.

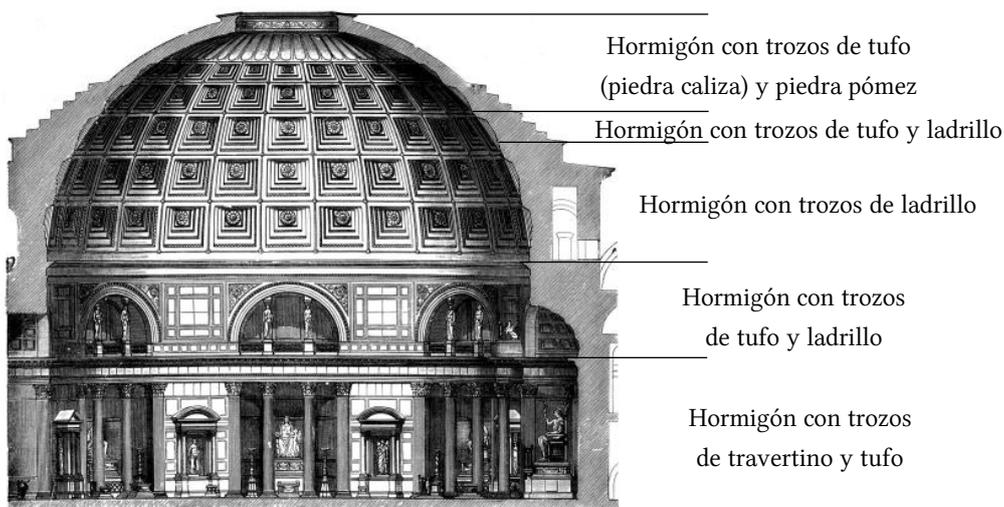


Figura 3.1 Ejemplo de utilización de hormigón ligero en el Panteón de Roma.

Debido a la falta de áridos porosos naturales, en el s.XIX se comienza a investigar con áridos artificiales manufacturados. En Europa se desarrolla la escoria de alto horno esponjada en la primera mitad del s.XX. El desarrollo de los áridos de arcilla expandida surge en EEUU en la primera mitad del s.XX con nombres como Gravelite, Terlite o Rocklite. La pizarra expandida se produce por primera vez en 1917 por S.J. Hayde en EEUU bajo el nombre de Haydite. Uno de los primeros ejemplos es el barco Selma construido a finales de la Primera Guerra Mundial, 1917 [43].

En Europa (Dinamarca), en 1931, se desarrolla la LECA (lightweight expanded clay aggregate), un producto de arcilla expandida, y rápidamente se extiende su producción por otros países como Alemania, Holanda o Reino Unido y surgen productos similares.

Con el objetivo de desarrollar un hormigón de alta resistencia con una densidad menor en Alemania (1966) se desarrolla un árido de pizarra expandida denominado Liapor con la capacidad de producirse con una densidad variable de 800 a 1.700 kg/m<sup>3</sup>. Esto supone un gran beneficio pues permite producir un árido con una determinada densidad para una densidad de diseño del hormigón.

### 3.1.2 Definiciones

#### 3.1.2.1 Hormigón ligero

El hormigón ligero es aquel que se caracteriza por tener una densidad aparente inferior a la del hormigón convencional y, como criterio general, se puede decir que es un hormigón con una densidad inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, existen distintos tipos de hormigones ligeros en función de cómo logran la reducción de la densidad o su uso y, por ello, existen también diferentes definiciones.

En cuanto al uso para el que se pueden utilizar se diferencian entre hormigón estructural y no estructural. Las normas como la instrucción española de hormigón estructural (EHE-08) o el Eurocódigo 2 (Capítulo 11) solamente contemplan los hormigones ligeros estructurales, estableciendo definiciones diferentes de lo que es un hormigón ligero.

La EHE-08 define como hormigón ligero estructural (HLE) aquel hormigón de estructura cerrada, cuya densidad aparente, medida en condición de seco hasta peso constante, es inferior a 2000 kg/m<sup>3</sup>, pero superior a 1200 kg/m<sup>3</sup> y que contiene cierta proporción de árido ligero, tanto natural como artificial. Se excluye a los hormigones celulares, tanto de curado estándar como curados en autoclave. La resistencia mínima se establece en 15 o 20 N/mm<sup>2</sup> en función del tipo de árido y la resistencia máxima considerada en la norma es de 50 N/mm<sup>2</sup>.

El Eurocódigo 2 define el hormigón con árido ligero (LC) como un hormigón que tiene una estructura cerrada y una densidad no mayor que 2200 kg/m<sup>3</sup>, y que contiene una proporción de áridos ligeros artificiales o naturales con una densidad de partículas menor que 2000 kg/m<sup>3</sup>. No se consideran hormigones aireados tanto si es hormigón celular curado en autoclave o curado normalmente ni tampoco hormigones con árido ligero de estructura abierta.

Solamente el hormigón ligero estructural puede ser armado o pretensado, tomando las recomendaciones y precauciones que establece la normativa en cada caso. Cuanto menor es la densidad, menor es la resistencia del hormigón, pero mayor su capacidad aislante, por lo que los hormigones no estructurales son aquellos que no cumplen con la resistencia mínima pero debido a sus propiedades son adecuados para rellenos, elementos decorativos o como aislante térmico.

#### 3.1.2.2 Árido ligero

Se denomina árido ligero a aquel que tiene una densidad de partícula menor a 2000 kg/m<sup>3</sup> o una densidad seca aparente menor a 1200 kg/m<sup>3</sup> [43]. Es importante establecer esta doble definición



das. Por otro lado, existen otro tipo de hormigones ligeros de modo que se puede dar una clasificación general de los hormigones que pueden encontrarse en función de cómo se logra la reducción de la densidad:

1. Utilización de áridos de menor densidad que los convencionales, que pueden ser tanto naturales como artificiales.
2. Eliminación de la dosificación de un hormigón convencional las fracciones más finas, generalmente la arena, empleando solo árido grueso de densidad normal o ligero. Esto produce un hormigón con grandes huecos intersticiales.
3. Incorporando en un hormigón fino, sin gruesos, burbujas de gas, lo que se denomina hormigón celular. Dentro de este tipo se puede diferenciar los hormigones aireados, con burbujas de aire creadas por la reacción química de un gas, y los hormigones espumados, donde se introduce una sustancia espumosa en la mezcla para crear los huecos.

La Figura 3.3 muestra una imagen de cada uno de estos tipos de hormigones ligeros.

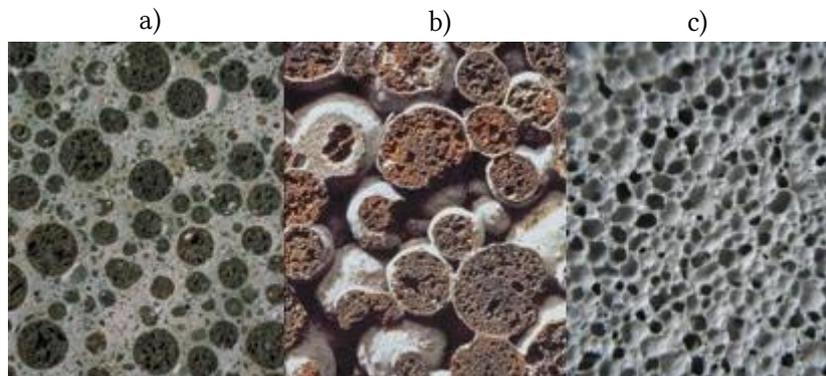


Figura 3.3 (a) hormigón con árido ligero, (b) hormigón sin finos, (c) hormigón celular.

### 3.2.1 Hormigón celular

Los ingredientes generales de un hormigón celular son cemento, arena, agua y aire, es decir, no contiene árido grueso y se puede incluso prescindir de la arena. La baja densidad se consigue mediante la adición de un aditivo espumante muy potente y un sistema complejo de preparación que consigue un hormigón de muy baja densidad sin requerimientos de resistencia importantes. El problema de estos hormigones estriba en la dificultad de conseguir el volumen y las densidades adecuadas, ya que se debe provocar la reacción del espumante con un chorro de agua a alta presión durante un tiempo determinado, lo cual puede crear cierta variabilidad en el resultado final. Son mezclas con mucho contenido en cemento y poco en árido, con coeficientes térmicos bajos y cuyo uso se centra en recrecidos o rellenos transitables, ocasionalmente, tanto para cubiertas como para zonas de terminación.

Generalmente a la arena, cal y cemento se le adiciona un agente expansor químico que reacciona con la cal del cemento formando burbujas que quedan atrapadas en la matriz. El agente expansor se mezcla como último ingrediente y una vez conformada la pieza se deja reposar para que se

desarrollen las burbujas de hidrógeno y que tiene una textura similar a un bizcocho. Finalmente se puede introducir el hormigón en autoclave para optimizar el curado.

El hormigón celular es muy ligero y su densidad puede estar en torno a  $650 \text{ kg/m}^3$ , una baja absorción debido al contenido de aire, alta resistencia al fuego, buen aislamiento acústico y se puede serrar y cortar de igual forma que la madera. Se puede encontrar tanto como producto prefabricado o fabricarse en obra. Las densidades pueden ser muy variables en función de las cantidades de aire y tipo de áridos empleados, como aproximación general se muestra a continuación una relación entre densidad, resistencia y conductividad térmica en hormigones celulares [44] comparándolas con las de un hormigón convencional HM-25 (Tabla 3.1).

Tabla 3.1

Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Resistencia (MPa)	Conductividad térmica ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
2400	25	1.63
800	5.6	0.22
600	4.8	0.16
500	3.5	0.13
400	2.2	0.11

## 3.2.2 Hormigón con árido ligero

### 3.2.2.1 Clasificación de los áridos

Los áridos ligeros que se pueden emplear para fabricar un hormigón ligero estructural, básicamente, se clasifican en áridos naturales, generalmente tomando como recurso material volcánico, y áridos artificiales que son producidos mediante procesos térmicos. La EHE-08 hace una escueta clasificación de los áridos ligeros aptos para el hormigón ligero estructural que se muestra en la Figura 3.4.

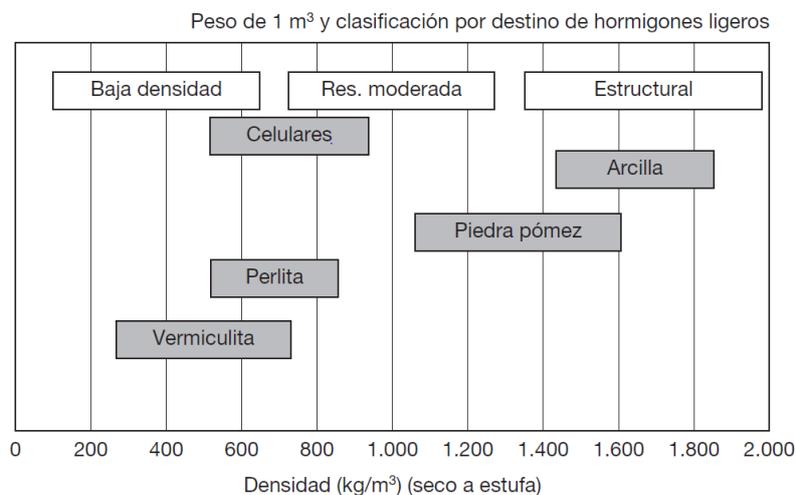


Figura 3.4 Rangos de densidad y clasificación de hormigones ligeros según la EHE 08.

Sin embargo, existen multitud de áridos, como los consistentes en pizarras o esquistos expandidos que son los más comunes para la elaboración de hormigones ligeros. Se pueden emplear como único árido o en combinación con áridos convencionales en cualquier tipo de hormigón ligero. Otra clasificación más completa la ofrece Neville y Brooks en el siguiente gráfico (Figura 3.6 [45]).

### 3.2.2.2 Áridos naturales

Los áridos naturales pueden tener dos orígenes: origen volcánico u origen orgánico. El árido natural más comúnmente empleado es aquel que tiene un origen volcánico. La lava en un volcán sufre un proceso de enfriamiento brusco en el que se forma una masa amorfa, sin cristalización, con un aspecto vítreo similar al de la obsidiana. Así mismo, la lava contiene aire y gases, de modo que al enfriarse estos gases quedan atrapados en la estructura produciendo una masa porosa de estructura amorfa. El árido se produce a partir de este material mediante trituración mecánica, molienda y tamizado. A este material se le denomina árido volcánico, pómicice o escoria (Figura 3.5).



Figura 3.5 Pómicice.

La puzolana, es una roca natural formada por escorias volcánicas, de textura escoriácea y alveolar. Debido a la existencia de escorias soldadas es preciso hacer un machaqueo y calibrado previos a su uso comercial. Tiene una composición muy variable, con altos contenidos en sulfuros

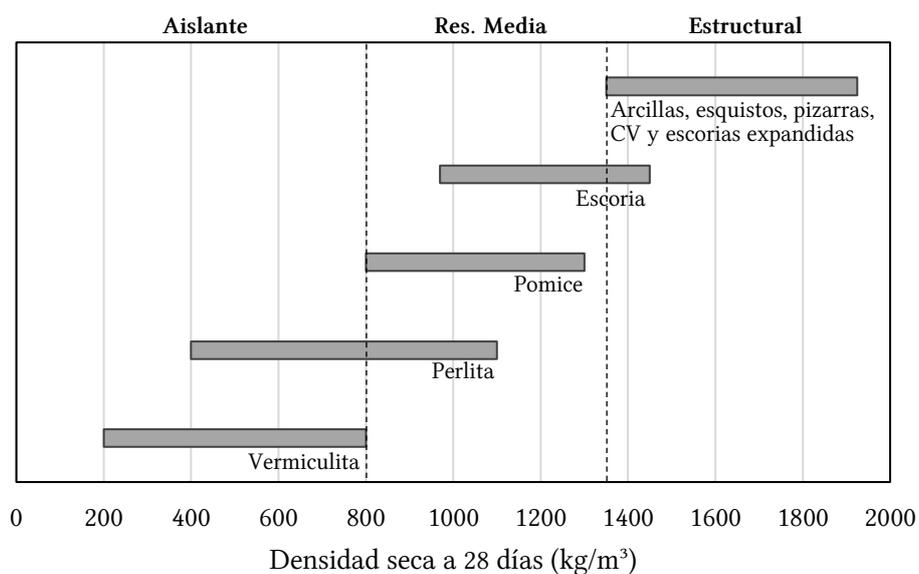


Figura 3.6 Rangos de densidad típicos de hormigones con distintos áridos ligeros.

resultantes de la percolación de fumarolas. Su resistencia es muy variable, por la poca homogeneidad del material, por lo que no es adecuada para usos estructurales [46].

Una alternativa medioambientalmente más favorable es la utilización de material de desecho como árido para la producción de un hormigón ligero. Un ejemplo comprobado es la sustitución del árido ligero convencional (mineral) por un árido orgánico como la cáscara de la semilla de palma o la cáscara de coco.

La cáscara de palma es un producto de desecho de la agricultura en la producción de aceite de palma y se encuentra en grandes cantidades en las regiones tropicales. Es posible producir un hormigón ligero de alta resistencia [47] sustituyendo el árido grueso por árido procedente de la cascara o cuesco de la palma (ACP), consiguiendo una resistencia de 45 MPa y una densidad de 1.900 kg/m<sup>3</sup>.

Actualmente el aceite de palma es ampliamente el aceite más consumido en la tierra debido a que presenta la mayor eficiencia de cultivo (3.8 t/ha)[48], siendo los productores principales Indonesia y Malasia, aunque cada vez más se cultiva en otros países como Tailandia, Nigeria o Colombia, todos países cercanos al ecuador ( $\pm 10^\circ$ ). El aceite proviene del fruto de la palma africana/palma americana (*Elaeis guineensis*/*Elaeis oleifera*) que se aloja en racimos de 5-40 kg que cuelgan de la palma. La semilla que albergan en el interior del fruto está protegida por una cubierta dura denominada comúnmente cuesco (Figura 3.7), el cual se utiliza para la elaboración de los áridos gruesos una vez machacado.



Figura 3.7 Racimo de frutos y partes del fruto de la palma africana.

De la fermentación de los frutos se obtiene el aceite de palma crudo (del mesocarpio), torta de palmiste (de la almendra) que se utilizará para extraer aceite de palmiste y lodos.

En la elaboración del aceite de palma se obtienen además unos subproductos: racimos de fruto vacíos (RFV), fibras provenientes del mesocarpio, cuescos y torta de palmiste. Las fibras y los cuescos generalmente se emplean como combustible en las calderas de fermentación, pero son precisamente los cuescos los que se han empleado también como árido para crear hormigones ligeros. Teniendo en cuenta que por cada tonelada de aceite crudo se pueden obtener entre 130 kg y 400 kg de cuescos [49], es una cantidad importante para su utilización en hormigones ligeros.

De la combustión de los cuescos de palma se obtiene un clínker de palma (CP) que una vez machacado puede emplearse también como árido ligero en los hormigones. Así, a partir de los cuescos



Figura 3.8 (a) Árido de cuesco de palma (ACP); (b) Clincker de palma (CP); (c) Árido de cáscara de coco.

de palma se pueden obtener distintos tipos de áridos (Figura 3.8): el cuesco original (a), el cuesco triturado para tener unos tamaños más adecuados, el clincker de palma (b) y el árido de cáscara de coco (c) (ACC). Algunas de las principales propiedades características de dichos áridos se muestran en la junto con las de un árido convencional como el granito.

La durabilidad de este hormigón puede ser razonablemente buena en comparación con otros hormigones con árido ligero si se procura un curado mínimo de 7 días [54], logrando además una

Tabla 3.2 Propiedades físicas y mecánicas de áridos de granito y cáscara de palma.

Propiedades	Granito [50]	ACP [51]	CP [51]	CP [52]	ACC [53]
Tamaño árido (mm)	5-12.5	5-12.5	5-13	<5	3-12
Peso específico (saturado superficialmente seco)	2.61	1.17	1.82	2.01	1.15
Densidad aparente compactada (kg/m <sup>3</sup> )	1470	590	780	1119	650
Absorción de agua a 24h (%)	0.76	23.3	4.35	26.45	23
Coefficiente al desgaste Los Ángeles (%)	24.00	4.80	27.1	-	-
Módulo de finura	6.33	6.24	6.75	3.31	6.2
Índice de lajas (%)	24.94	65.17	-	-	100
Deformación (%)	33.38	12.36	-	-	-
Coefficiente de impacto (%)	17.29	7.86	25.36	-	7.75

permeabilidad ( $6.4 \times 10^{-10}$  cm/s) y una absorción de agua (11%) comparables a otros hormigones ligeros con árido de pómicé o áridos como la arcilla expandida. Es necesario prolongar el curado debido al contenido de agua que presentan los áridos pre-mojados que proporcionan un curado interno más lento. La cáscara de palma como material orgánico tiende a degradarse biológicamente en presencia de aire y agua, sin embargo, esto no sucede cuando se encuentra embebido dentro de una masa de hormigón [55].

### 3.2.2.3 Áridos artificiales<sup>31</sup>

Los áridos artificiales incluyen a todos esos materiales que sufren un proceso térmico, proceden de la industria o están formados por plástico o algún tipo de polímero. Así se puede establecer una clasificación general como la siguiente:

- Áridos naturales elaborados: son aquellos materiales naturales como arcilla, perlita, vidrio, esquisto o pizarra que se someten a un proceso térmico el cual produce la expansión del material y la reducción de su densidad. También se encuentran aquellos que sufren un proceso como el sinterizado.
- Áridos industriales no elaborados: escorias de alto horno y cenizas volantes.
- Áridos industriales elaborados: aquellos productos provenientes de la industria que igualmente se someten a procesos térmicos como la expansión o sinterizado.
- Áridos poliméricos: consistentes en partículas de plástico, polímeros o porexpan.

La *perlita* (1) es producto del calentamiento de vidrios volcánicos a temperaturas entre 900 y 1.100 °C. Se trata de rocas vítreas ricas en sílice, de color claro y con una elevada dureza (5,5 a 7 en la escala de Mohs). Es un material ultraligero cuyo uso principal es para aislamiento, debido a su baja conductividad y a su ligereza (30 a 180kg/m<sup>3</sup>). No obstante, su resistencia a compresión es muy baja (inferior a 0,5MPa).

La *vermiculita* (2) exfoliada es un árido muy ligero (50 a 125kg/m<sup>3</sup>), de color entre amarillo claro y marrón oscuro, que se obtiene mediante cocción de ciertos filosilicatos a temperaturas entre 900 y 1.100°C. Se presenta en forma de apilamiento de láminas inelásticas, y es de dureza similar a la mica (1,5 a 2,5 en la escala de Mohs).

La *puzolana* (3) es una roca natural formada por escorias volcánicas, de textura escoriácea y alveolar. Debido a la existencia de escorias soldadas es preciso hacer un machaqueo y calibrado previos a su uso comercial. Tiene una composición muy variable, con altos contenidos en sulfuros resultantes de la percolación de fumarolas. Su resistencia es muy variable, por la poca homogeneidad del material, por lo que no es adecuada para usos estructurales.

*Esquisto y pizarra expandidos* (4): tienen una composición muy parecida a la arcilla expandida, tienen un proceso de fabricación muy semejante en hornos rotatorios. Los esquistos tienen un contenido en carbono entre el 4 y el 10%, y con una temperatura de expansión más alta (1.350 a 1.400°C). Por lo demás no existen grandes diferencias. Su aplicación, debido a una densidad más elevada, se da prioritariamente en hormigones estructurales y prefabricados. Por lo general no se usa con fines aislantes.

---

<sup>31</sup> Fuente: [46]

La *arcilla expandida* (5) es el árido ligero más versátil que se conoce. Tiene un rango de aplicación que cubre desde los hormigones aislantes ( $550\text{kg/m}^3$ ) hasta los hormigones de alta resistencia con densidades inferiores a  $2.000\text{ kg/m}^3$ . Observada en el microscopio, la arcilla expandida presenta una estructura porosa cerrada formada por los gases producidos por la materia orgánica incinerada durante el proceso de fabricación. En esta estructura de poros no comunicados está el origen de todas las altas prestaciones de la arcilla expandida.

*Escoria y ceniza volante sinterizada*: La escoria es un subproducto de la fabricación del hierro y las cenizas que se producen principalmente en las plantas térmicas. El proceso de sinterización consiste en la fusión de la escoria o la ceniza machacada entre sí formando pellets ligeros (partículas de forma más o menos cilíndrica). Su densidad es muy alta por lo que su uso fundamental es para la realización de hormigones estructurales, un ejemplo es el producto comercializado como Lytag, en forma de pequeñas esferas con un aspecto similar a la arcilla expandida.

El *vidrio celular* (6), llamado también vidrio expandido, es un material de construcción de aparición relativamente reciente creado a partir de polvo de vidrio cocido. Se utiliza fundamentalmente como aislante térmico o como protección contra el fuego y, también, para falsos techos en lugares muy húmedos o con necesidad de mantener buenas condiciones de asepsia, además de como agregado en la confección de hormigones ligeros. Debido a que las burbujas o células que encierra el material no están comunicadas entre sí, es impermeable al agua y al vapor de agua, y es muy buen aislante térmico, además de ser incombustible. Otra característica importante es que se trata de un material de muy baja conductividad térmica (en torno a  $0,048\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ).

*Porexpan y porexpan reciclados*: muchas empresas utilizan el porexpan (Poliestireno Expandido o EPS) para formar sus moldes, envases, piezas de soporte, construcción, etc. Esta manipulación genera un sobrante que queda separado en pequeños elementos llamados vulgarmente “perlititas” y que es un subproducto que se debe reducir, reciclar o llevar a un vertedero autorizado. Este



Figura 3.9 Áridos artificiales empleados para hormigón ligero.

tipo de perlitas, tratadas o sin tratar, pueden ser utilizadas de manera similar a como se usa el porexpan limpio. En concreto, son usadas para la fabricación de hormigones y morteros ligeros para la construcción. Existen dos tipos, las naturales y las recicladas. Si bien, cabe destacar que las recicladas generan resistencias a compresión inferiores en hormigones o morteros ligeros que tienen este producto como árido único ( $< 0.5 \text{ N/mm}^2$ ). Su conductividad térmica es  $\lambda < 0,13$  según UNE-EN-1745:2002, por lo que forman morteros reciclados con densidades que rondan los  $300 \text{ Kg/m}^3$ . La densidad de partícula del EPS está en torno a  $10\text{-}50 \text{ kg/m}^3$  con una resistencia a compresión  $0.12\text{-}0.36 \text{ MPa}$ , y son hidrofóbicas, por lo que no absorben agua en su interior [56].

En definitiva, el uso de perlitas como material reciclado, que se estaba retirando a vertedero forzosamente o tratado químicamente para su eliminación, puede incorporarse a productos constructivos derivados del cemento evitando así la creación de material nuevo para tal fin. Algunas de las propiedades típicas se muestran en la para algunos áridos ligeros empleados.

**Tabla 3.3 Propiedades típicas de los áridos ligeros.**

Tipo	Densidad seca aparente ( $\text{kg/m}^3$ )	Absorción de agua* (% masa)
Arcilla expandida	350-500	12-14
Pizarra expandida	560-720	10-15
Esquisto expandido	500-800	12-14
Pomice	500-880	30-40
Lyttag <sup>®</sup>	800-850	9-15
Escoria de alto horno expandida	850-950	3-5

Lyttag<sup>®</sup>: ceniza volante sinterizada

\* Fracción gruesa, la fracción fina es más densa

Se puede comprobar que los áridos ligeros tradicionales tienen similar densidad aparente que los áridos orgánicos como el cuesco de palma o la cáscara de coco (ver ).

### 3.3 Dosificación

La dosificación de un hormigón ligero puede variar tanto como tipos de hormigones hay. Al comienzo del capítulo se describieron de manera general tres formas de lograr un hormigón ligero: incorporando árido ligero, eliminando la arena o incorporando gas o aire a la mezcla. En función del método por el que se opte la dosificación cambia sustancialmente como cabe esperar. Sin embargo, como criterio general se han de tener en cuenta algunas consideraciones sobre el hormigón ligero.

La primera consideración es sobre la resistencia de los áridos, pues como se dijo anteriormente, éstos rompen con el hormigón, y la resistencia del mortero que los envuelve cobra más importancia. Por ello, las dosificaciones de hormigones ligeros tienden a contener más cantidad de cemento u otros materiales cementicios como la puzolana o el humo de sílice. Para una misma consistencia, la resistencia aumenta con el contenido de cemento, dependiendo del tipo de árido que se emplee [43].

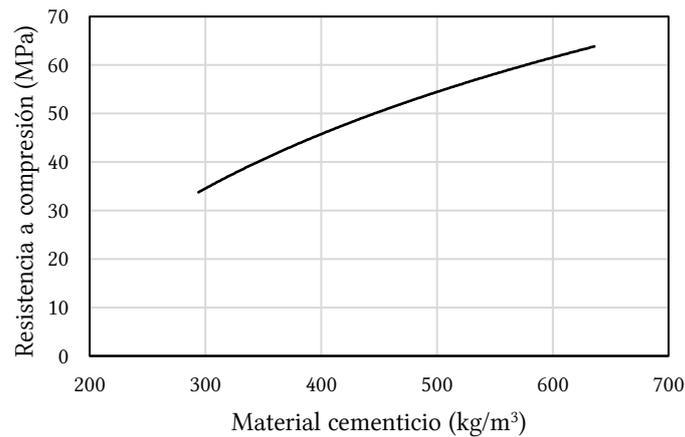


Figura 3.10 Relación de la resistencia a compresión respecto al contenido de material cementicio en hormigones con árido ligero.

Para áridos ligeros convencionales como la arcilla expandida y similares, la relación de la resistencia con el contenido de cemento sigue una curva como la de Figura 3.10 [57], con ligeras modificaciones en función del tipo de árido.

Sin embargo, cuando se utiliza el poliestireno expandido (EPS) como árido, existen otros factores que influyen en la resistencia a compresión del hormigón como son la cantidad de árido de EPS, su tamaño y su densidad. La Figura 3.11 [58] muestra la relación de densidad y volumen de árido EPS empleado con la resistencia a compresión. Es decir, a mayor densidad del EPS mayor resistencia a compresión se obtiene y a mayor volumen de EPS empleado menor es la resistencia de manera proporcional y siendo más acusado dicho efecto en dosificaciones pobres. Además, para partículas más pequeñas se obtienen resistencias a compresión mayores (Figura 3.12) [59],[60].

Por otro lado, ha de tenerse en cuenta a la hora de diseñar una dosificación la mayor demanda de agua de los áridos ligeros respecto a los convencionales salvo que se cuente con un árido ligero

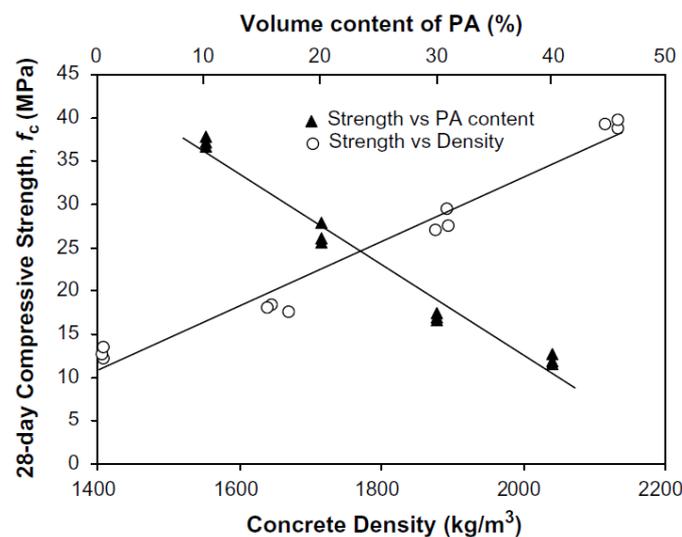


Figura 3.11 Influencia de la cantidad y densidad del árido EPS en la resistencia a compresión.

hidrófugo. Si no se tuviera en cuenta la absorción de agua de los áridos ligeros se produciría una excesiva reducción de agua efectiva en la pasta de cemento, lo que provocaría en primera instancia una modificación del comportamiento en estado fresco del hormigón, su trabajabilidad, así como la capacidad para poder bombearse, y finalmente y más grave, una disminución en las características de resistencia y durabilidad del hormigón en estado endurecido.

Para soslayar la mayor demanda de agua del árido ligero, se puede aplicar alguno de los métodos siguientes:

1. Inmersión de los áridos en agua durante 12 horas.
2. Preamasado del árido con la arena con al menos el 50% del agua total
3. Semisaturación del árido ligero mediante regado abundante con aspersores y/o difusores durante al menos 24/48 horas antes de la utilización.

Para controlar la absorción de agua del árido y conseguir una mezcla homogénea es conveniente aumentar el tiempo de amasado con respecto a un hormigón convencional. El amasado se puede realizar por vía seca o húmeda, aunque por vía húmeda se obtiene una regularidad mayor en el producto final.

Las adiciones que normalmente se emplean y dan buenos resultados son cenizas volantes o humo de sílice debido a que consiguen mayores compacidades en los hormigones y mejoran las características resistentes.

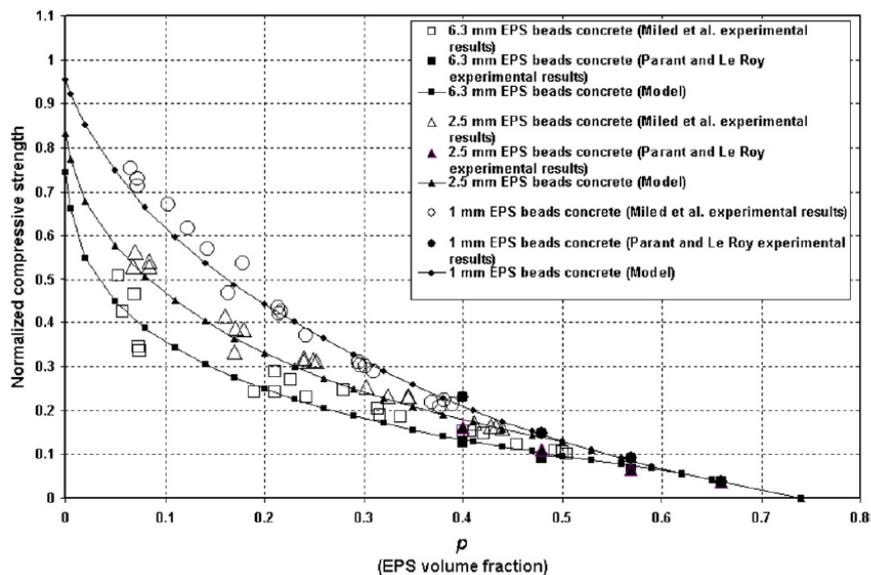


Figura 3.12 Relación de la resistencia a compresión con el volumen de EPS para tres tamaños distintos de las partículas de EPS.

Teniendo en cuenta la variabilidad que pueda presentar una dosificación en función de la densidad deseada, a continuación, se muestran algunas dosificaciones típicas posibles para fabricar un hormigón ligero con árido ligero convencional (LWA) (Tabla 3.4 [57],[61]).

Tabla 3.4 Dosificaciones empleadas en hormigón con árido ligero.

Autor	Cemento	CV	Agua	Arena	LWA	SP	a/c	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Res. Comp. (MPa)
Wilson & Malhotra [44]	504	0	156	513	768	3,6	0,31	1944	56,6
	501	135	185	440	658	4,1	0,37	1924	60,3
	405	0	146	625	762	3,6	0,36	1941	41,5
	400	110	168	567	692	4,3	0,42	1941	57,5
	294	0	129	741	739	3,5	0,44	1906	30,2
	297	78	142.5	681	679	3,6	0,48	1881	50,3
Lo & Cui [61]	450	0	240	765	653	-	0,53	2112	51

CV: ceniza volante; LWA: árido ligero; SP: superplastificante.

Se recomienda una consistencia blanda en fabricación para que la puesta en obra sea poco plástica y nunca seca, evitando a su vez una consistencia fluida ya que debido a la baja densidad de los áridos podría producirse una segregación por flotación de los áridos. Sin embargo, este problema, así como el bombeo correcto con las bombas habituales se puede solucionar con el uso de aditivos. Para el caso de los hormigones espumados la Tabla 3.5 [62], muestra algunas dosificaciones empleadas por diversos autores.

Tabla 3.5 Dosificaciones para hormigón espumado.

Autor(es)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Ratios			Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Res. Compresión (28 días)
		s/c	a/c	CV/c		
Mccormick [62]	335-446	0.79-2.8	0.35-0.57	-	800-1800	1.8-17.6
Tam et al. [63]	390	1.58-1.73	0.6-0.8	-	1300-1900	1.81-16.72
Durack and Weiqing [62]	270-398	1.23-2.5	0.61-0.82	-	982-1185	1-6
	137-380	-	0.48-0.7	1.48-2.5	541-1003	3-15 (77 días)
Jones and McCarthy [64]	300	1.83-3.17	0.5	-	1000-1400	1-2
Jones and McCarthy [65]	500	-	0.65-0.83	1.15-1.77	1400-1800	20-43

s: arena; c: cemento; CV: ceniza volante

La dosificación de hormigones con áridos de PS o EPS (poliestireno expandido) es recomendable realizarla prehumectando las esferas de PS con agua y un superplastificante para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón [66], pues la superficie de contacto árido-pasta tiene un papel crítico en la consistencia y resistencia final del hormigón. Además, reduce la segregación por flotabilidad de las esferas más pequeñas y es imprescindible cuando el contenido de EPS en la mezcla es alto [67]. Así mismo, la dosificación de EPS se realiza en volumen (l/m<sup>3</sup>), de modo que la sustitución de árido convencional se realiza por volumen equivalente.

Sabaa y Ravindrarajah emplea partículas de EPS fragmentadas en formas angulosas y cubiertas por una sustancia química hidrofílica para lograr una distribución homogénea de las mismas en la mezcla sin que se produzca segregación. Las partículas tienen una densidad de partícula y densidad aparente de 58.5 y 26.8 kg/m<sup>3</sup> respectivamente y un tamaño máximo de 3.7 mm. Como árido fino natural emplea arena y como árido grueso basalto con tamaño máximo de 10 mm.

Tabla 3.6 Comparativa de dosificaciones con EPS y MEPS.

Referencia	Cemento	CV	Agua	a/(a+CV)	CA	Arena	EPS (l/m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	R.C. a 28 días (MPa)
Perry et al. [56]	350-550	-	122-192	0.35	-	350-550	412-595	800-1300	3-15
Sabaa y Ravindrarajah [68]	545	-	230	0.42	250-585	750	585-250	1640-2060	13.8-32.2
	410	-	220	0.54	242-564	900	564-242	1600-2000	8.8-21.3
Park y Chisholm [69]	350-450	-	180	0.4-0.51	-	0-340	1000-850	550-1040 <sup>c</sup>	0.8-6.7
	230-300	120-150	180	0.4-0.51	-	0-340	1000-850	520-990	0.7-4.9
Babu y Babu [70]	335-605	10-55 <sup>a</sup>	152-185	0.28-0.44	0-650	305-1028	360-630 <sup>b</sup>	1500-1800 <sup>c</sup>	10.2-21.4
Babu et al. [71],[72]	140-310	140-310	185-225	0.4-0.65	0-430	6-172	163-665	580-1720 <sup>c</sup>	1.1-12.5
Kan y Demirboğa [67]	500	-	190-215	0.38-0.43	0-800	0-400	52-185	876-1956	12.6-23.3
Ahmed et al. [73]	437.5	-	140	0.32	0-1104	624	45-450 <sup>d</sup>	1675-2546	23-51.4
	437.5	-	140	0.32	1227	0-562	24-236 <sup>d</sup>	1916-2577	34.7-55.7

<sup>a</sup> Humo de sílice; <sup>b</sup> Dos tamaños: 6.3 y 4.75 mm; <sup>c</sup> Densidad húmeda; <sup>d</sup> emplea MEPS (EPS modificado).  
CV: ceniza volante; CA: árido grueso; EPS: árido de poliestireno expandido.

Park y Chisholm hicieron dos tipos de mezclas, la primera sin ceniza volante y la segunda con ceniza volante. Solamente lograron rellenar completamente los huecos con pasta para el hormigón de 1000 kg/m<sup>3</sup> con menor cantidad de EPS (850 l/m<sup>3</sup>), ya que para el hormigón de 600 kg/m<sup>3</sup> y 1000 l/m<sup>3</sup> solamente se cubrían las partículas lo suficiente para unirse unas con otros, dando lugar a un hormigón con gran porosidad como una mezcla sin finos.

Ahmed et al. emplearon primero áridos gruesos de MEPS con un peso específico de 0.24 y tamaño máximo de 20 mm como sustitución del árido grueso natural. Después hicieron lo propio para el árido fino natural, empleando partículas de MEPS de tamaño máximo 4.75 mm y peso específico 0.34. La sustitución se hizo siempre sumergiendo las partículas 24h en agua y posterior secado, sustituyendo el árido natural desde el 10% hasta el 100% del total del volumen de los áridos de cada tamaño en intervalos de 10%.

Teo et al. [54] comprueba que la resistencia del hormigón con ACP continúa aumentando la resistencia tras 6 meses, por lo que no se evidencia ningún tipo de deterioro biológico del árido orgánico. Así mismo, para edades inferiores a 28 días en el hormigón la fractura del hormigón se produce alrededor del árido, mientras que para edades superiores a 56 días la fractura viaja a través del árido [74], tal y como es habitual en los hormigones ligeros. Shafigh et al. [47] han desarrollado un hormigón de alta resistencia a partir de ACP empleando para ello cuescos de palma maduros o sin fibra, de esta forma se obtiene una menor absorción de agua por parte del árido y una mejor trabajabilidad de la mezcla. También recomienda un curado de al menos 7 días para obtener un desarrollo adecuado de la resistencia. Yew et al. [68] estudiaron diferentes tipos de ACP y obtuvieron las mayores resistencias a compresión con cuescos de palma procedentes de frutos tipo *dura*, y más maduros (10-15 años). El tipo de variedad del fruto, *dura* o *tenera*, influye más en la resistencia a compresión del hormigón que los años de madurez del árido, siendo la variedad *dura* la que presenta cuescos más gruesos y duros, aunque es más productiva la *tenera* para la producción de aceite de palma.

Mohammed et al. [80] además del árido grueso emplea árido fino procedente del CP como sustituto a la arena convencional. Abutaha e Ibrahim emplean como filler polvo de CP para rellenar y cubrir la porosidad superficial del árido de CP y así tener mejores características en el hormigón fresco y en el hormigón endurecido como la absorción de agua, durabilidad o resistencia.

Tabla 3.7 Dosificaciones de distintos autores para hormigones con áridos orgánicos.

Autor	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Ratios				SP (%)	Densidad	R.C. 28 días (MPa)
		Agua	Filler	Arena	LWA			
<u>OPS</u>								
Mannan y Ganapathy [75]	480	0.41	0	1.71	0.77	-	1890-1905	24.2
Teo et al. [54], [55], [74]	510	0.38	0	848	308	1.5	1963	28.12
Shafigh et al. [47]	480	0.38	0	2.19	0.61	1-1.8	1988	47.22
	550	0.425	0.344	1.43		1	1878	46.51
	550	0.425	0	1.73	0.5	1	1835	46.15
Muda et al. [76]	~580	0.4	0.05 <sup>a</sup>	1.5	0.45	2	1973	27.7
Yew et al. [77]	550	0.3	0.05 <sup>a</sup>	1.56	0.69	1	1970-1986	40.4-54.4
Mo et al. [78]	416	0.327 <sup>c</sup>	0.25 <sup>d</sup>	2.26	0.96	1	-	26
	208	0.327 <sup>c</sup>	1.5 <sup>d</sup>	4.52	1.92	1	-	19
<u>PC</u>								
Mannan y Neglo [79]	350	0.6	0	0.8	1.65	1.9	1744 <sup>b</sup>	18.5
	450	0.6	0	0.8	1.65	1.9	2105 <sup>b</sup>	19.5
Mohammed et al. [80]	500	0.44	0	1.48	0.69	-	1769.2	30.9
Abutaha e Ibrahim	420	0.51	0.167	1.81	0.311 <sup>e</sup>	0.45	2032	51.27
	420	0.43	0.48	1.81	1.56	0.25	2293	40.52
<u>ACC</u>								
Gunasekaran y Kumar	480	0.42	0	1.63	0.81	-	1880-1930	19.1
Gunasekaran et al. [81]	510	0.42	0	1.47	0.65	-	1970	26.7

<sup>a</sup> Humo de sílice; <sup>b</sup> Hormigón desmoldado; <sup>c</sup> Incluye el filler; <sup>d</sup> Filler de escoria de alto horno.

<sup>d</sup> se añaden también 801 kg/m<sup>3</sup> de árido grueso de granito.

## 3.4 Características físico-mecánicas

### 3.4.1 Introducción

El árido ligero tiene una resistencia menor que el árido convencional, afectando a la transmisión de esfuerzos entre los áridos y el mortero que lo rodea. Mientras que en el hormigón convencional las tensiones se concentran en los áridos más rígidos, en un hormigón ligero éstas viajan a través del mortero (Figura 3.13 [82]) y generan tracciones en el árido que provocan que la fractura se produzca precisamente por el árido (Figura 3.14 [82]).

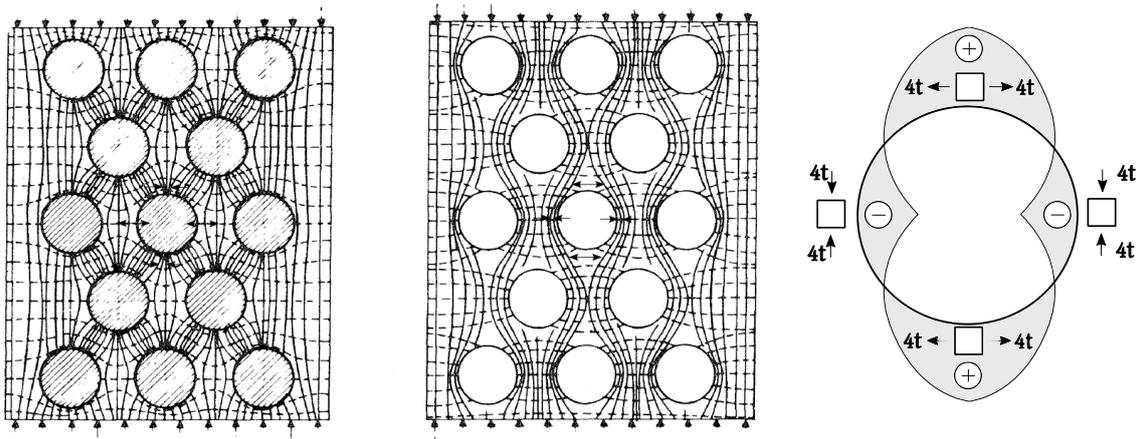


Figura 3.13 Distribución de tensiones en hormigón convencional y hormigón ligero. A la derecha del todo el problema teórico de una chapa infinita con taladro circular sometida a compresión  $t$ .

Sin embargo, debido a la porosidad de los áridos existe una mejor adherencia y mayor solidaridad entre los áridos y la matriz circundante, de modo que el hormigón ligero no rompe por dislocación entre los elementos sino por rotura del árido [61], como en el hormigón de alta resistencia. Es decir, la resistencia de un hormigón ligero depende en gran medida de la resistencia del mortero y, éste, de la cantidad de cemento. Por ello, los hormigones ligeros contienen mayor contenido de cemento, más aún si se requiere la misma resistencia que un hormigón convencional.

## 3.4.2 Resistencia a compresión

### 3.4.2.1 Resistencia del árido

La resistencia a compresión depende en gran medida del árido empleado, al igual que para el hormigón convencional, puede darse un amplio rango de resistencias de acuerdo con la amplia gama de áridos existentes. Por tanto, para evaluar la resistencia de un hormigón y compararla con uno convencional es importante considerar los componentes de cada uno.

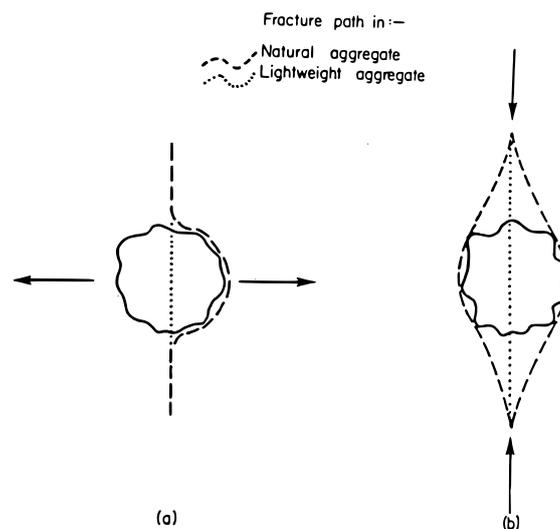


Figura 3.14 Comparativa de la trayectoria de la fisura en árido ligero y convencional.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la resistencia de los áridos es fundamental en la resistencia del hormigón, de tal forma que áridos menos resistentes requieren morteros más resistentes y con mayor contenido de cemento. En el hormigón con árido ligero es más relevante la relación de la resistencia con el contenido de cemento. Además, la resistencia máxima de un hormigón está limitada por el tipo de árido empleado.

La Figura 3.15 [43] muestra que una excelente unión entre partícula y matriz, así como módulos de elasticidad similares en partícula y matriz son determinantes en la eficiencia de la matriz.

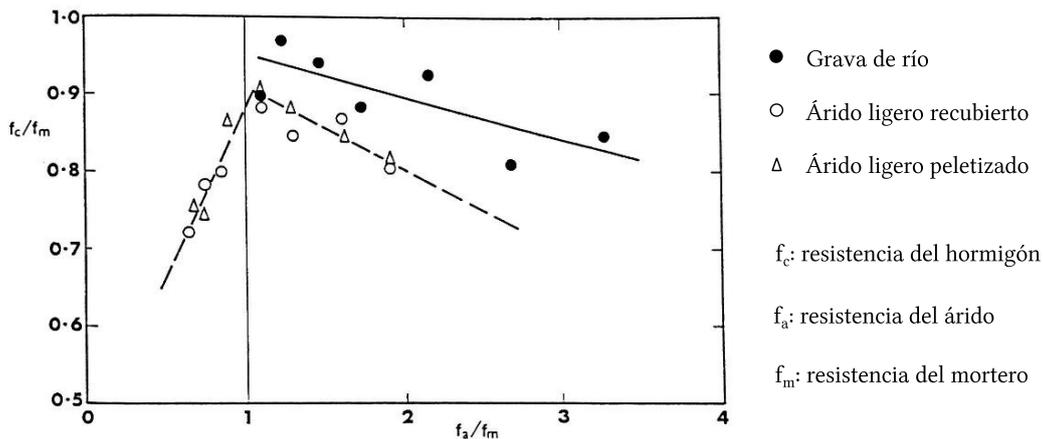


Figura 3.15 Relación de la resistencia del hormigón con la resistencia del árido.

### 3.4.2.2 Relación agua/cemento

La relación agua cemento (a/c) tiene el mismo efecto que en el hormigón convencional, es decir que a mayor valor de la relación a/c menor es la resistencia que se obtiene (Figura 3.16 [43]). Sin embargo, la porosidad de los áridos ligeros hace que la cantidad efectiva de agua sea difícil de

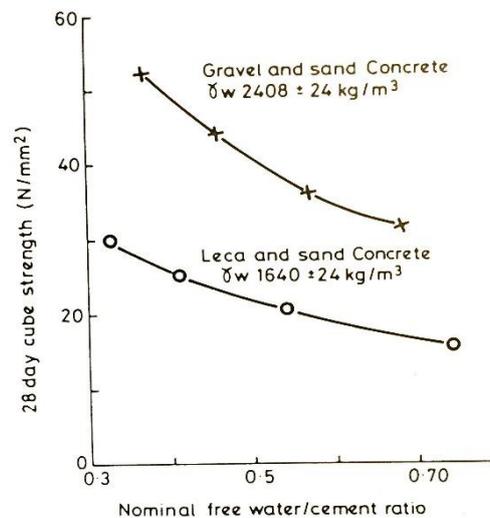


Figura 3.16 Relación de la resistencia con el ratio de agua/cemento

determinar y medir, por tanto, la relación a/c también. Por ello, para la realización de las dosificaciones los áridos suelen sumergirse previamente en agua con el fin de saturar total o parcialmente el árido y evitar la pérdida de agua efectiva.

No es baladí el asunto de la absorción de agua en el árido pues este puede llegar a reducir la relación agua/cemento hasta un 35% según estudios [83], lo que provocaría un incremento de la resistencia en el hormigón. Por otro lado, el contenido de agua libre es el mismo que para un hormigón convencional, entre 180 y 200 l/m<sup>3</sup>.

### 3.4.2.3 Contenido de cemento<sup>32</sup>

Para una determinada consistencia, la resistencia aumenta con el contenido de cemento, en función del tipo de árido (véase Figura 3.17, [43]). Normalmente el hormigón con árido ligero contiene cantidades de cemento mayores que el hormigón convencional debido a la resistencia del árido (apartado 3.4.2.1). Sin embargo, el incremento de resistencia debido al incremento del contenido de cemento varía en función del árido que se trate en cada caso y del propio contenido de cemento. Como promedio para el árido ligero, un incremento del 10% en el contenido de cemento supone un incremento aproximado en la resistencia del 5%.

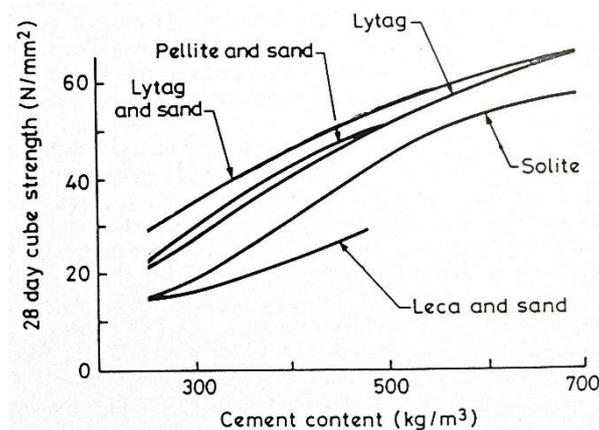


Figura 3.17 Relación de la resistencia a compresión con el contenido de cemento en hormigones con distintos áridos.

### 3.4.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de un material (E) depende de las rigideces de sus componentes y las proporciones de los mismos. Así, un hormigón puede considerarse simplificadaamente como un material bifásico constituido por áridos gruesos embebidos en una matriz que es el mortero. Por tanto, la rigidez del hormigón depende de la rigidez de los áridos y del mortero, la cual, depende a su vez de sus componentes que son cemento, agua y áridos finos. Los áridos ligeros tienen módulos de rigidez menores a los áridos convencionales, lo que provoca que el módulo final del hormigón

<sup>32</sup> Fuente: [43]

disminuya respecto a uno convencional, ello provoca que se tienda a aumentar el contenido de cemento.

Aunque el módulo de elasticidad no determina la resistencia y densidad de un material, en el caso del hormigón con árido ligero existe una correspondencia entre el módulo de elasticidad con su resistencia y densidad. La literatura ofrece numerosas formulaciones para estimar el módulo de elasticidad de un hormigón en función de su resistencia a compresión y, algunas, también de su densidad. Sin embargo, tiene un rango de variabilidad muy alto que depende fundamentalmente de la composición del hormigón, de tal forma que debe estudiarse dicha relación para cada caso particular. Es decir, que se tendrán relaciones del módulo E con la resistencia a compresión diferentes para cada tipo y cantidad de áridos empleados en el hormigón.

No obstante, la Tabla 3.8 y Figura 3.18 muestra una recopilación de dichas formulaciones existentes para calcular el módulo de elasticidad E (GPa) de algunos tipos de hormigones, donde  $\rho_s$  es la densidad seca del hormigón en  $\text{kg/m}^3$  y  $f_c$  es la resistencia de compresión del hormigón a la edad de 28 días en MPa.

**Tabla 3.8 Formulaciones existentes para calcular el módulo de elasticidad de diferentes tipos de hormigón.**

Referencia	Ecuación	Tipo hormigón	
[84] EHE 08	$E = 8.5 \times (f_c)^{1/3}$	HC	<b>Ecuación 3.1</b>
[85] ACI 318-05	$E = 4.7 \times (f_c)^{0.5}$	HC	<b>Ecuación 3.2</b>
[65] BS 8110	$E = 9.1 \times (f_c)^{0.33}$	HC	<b>Ecuación 3.3</b>
[85] ACI 318-05	$E = (\rho_s)^{1.5} \times (f_c)^{0.50} \times 4.3 \times 10^{-5}$	HL	<b>Ecuación 3.4</b>
[65] BS 8110	$E = (\rho_s)^2 \times (f_c)^{0.33} \times 1.7 \times 10^{-6}$	HL	<b>Ecuación 3.5</b>
[86] Alqahtani et al.	$E = 2.5 \times (f_c)^{0.64}$	PET, EPS	<b>Ecuación 3.6</b>
[56] Perry et al.	$E = (\rho_s)^{1.53} \times (f_c)^{0.25} \times 7 \times 10^{-5}$	EPS	<b>Ecuación 3.7</b>
[65] Jones&McCarthy	$E = 0.42 \times (f_c)^{1.18}$	FOAM (arena)	<b>Ecuación 3.8</b>
Jones&McCarthy	$E = 0.99 \times (f_c)^{0.67}$	FOAM (CV)	<b>Ecuación 3.9</b>

La formulación dada por la EHE-08 y ACI 318-05 (NC) son relativas a un hormigón convencional (HC) y son función de un  $f_c$  medio con definiciones sensiblemente diferentes. La formulación de la ACI 318-05 (HL) se da para hormigones con áridos ligeros convencionales (expandidos) que no tengan una resistencia a compresión inferior a 14 Mpa [56] o superior a 35 MPa [87] y la densidad esté comprendida entre 1500 y 2500  $\text{kg/m}^3$  [85].

La formulación dada por Perry et al. está referida a un hormigón con árido de poliestireno (tipo foam) con una densidad entre 600 y 1000  $\text{kg/m}^3$  y preferiblemente con un contenido de poliestireno del 50-60% en volumen (diámetro 3-8 mm) [56]. La formulación de Alqahtani et al. proviene de una regresión realizada con los datos experimentales de diversos autores ([88], [89]) con áridos de PET (Tereftalato de polietileno), EPS (poliestireno) [68] y PET cubierto superficialmente con escoria de alto horno [90] respectivamente.

Todos los estudios determinan que el módulo de elasticidad es inversamente proporcional al contenido de PS o PET, así como su resistencia a compresión. Sin embargo, Rahmani et al. [89]

obtuvieron un incremento aproximado del 10% en la resistencia a compresión con una sustitución del 5% de árido fino por partículas de PET reciclado. Así mismo, Albano et al. [88] obtuvo la mayor resistencia a compresión para un contenido de árido PET del 10%.

Debido al menor módulo de elasticidad del hormigón ligero, las deformaciones serán superiores a las del hormigón convencional para una misma carga, aunque el efecto se reduce si se tiene en cuenta que la carga por peso propio se reduce. Sin embargo, bajo condiciones dinámicas, como impactos o fluctuaciones de la carga, la reducción de la rigidez puede ser beneficiosa.

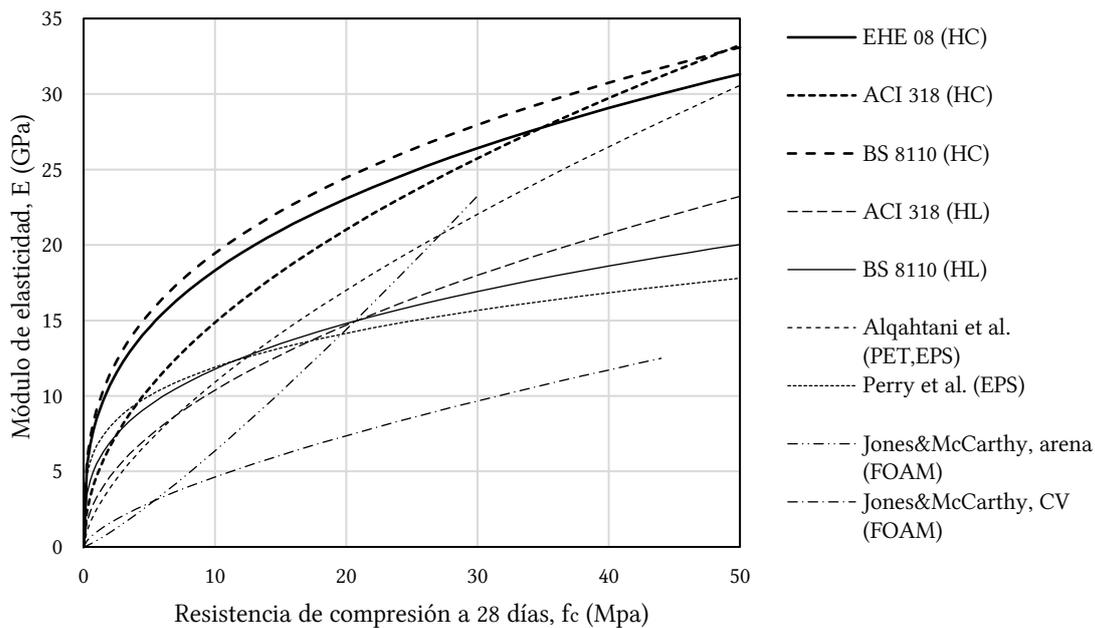


Figura 3.18 Relaciones E- $f_c$  dadas por diversos autores para distintos tipos de hormigones

### 3.4.4 Retracción y fluencia

*Retracción.* La retracción en el hormigón con áridos finos ligeros generalmente es superior a la del hormigón con áridos convencionales ( $\times 1.0-1.5$ ), pero es similar cuando en el hormigón ligero se utilizan finos densos convencionales. La retracción y la fluencia son fenómenos que se dan simultáneamente y debido a esto, tal vez la fisuración por retracción es poco frecuente, ya que se mitiga por el efecto de la fluencia, el aporte continuo de agua de los poros del árido y una capacidad a tracción superior en el árido ligero que en el convencional tal y como se recoge en la BS 8110, Parte 2, Tabla 3.2 [91], [43].

La Figura 3.19 [82] muestra la comparación de la evolución de la retracción en un hormigón ligero y en un hormigón convencional durante dos años. En el eje de abscisas se marcan las edades en escala logarítmica mientras que en el eje de abscisas se indica la variación de la retracción en tanto por ciento respecto del total experimentado en los dos años. Se observa que, a edades tempranas del hormigón, momento en el que el hormigón es más propenso a experimentar fisuraciones por retracción, la deformación por retracción en el hormigón ligero es muy inferior a la de un hormigón convencional. Esto se debe al efecto beneficioso de la devolución a la masa de mortero

del agua absorbida por el árido grueso poroso. En los primeros siete días las deformaciones por retracción en un hormigón convencional son superiores en más de un 400% a las de un hormigón ligero. A la edad de 28 días las deformaciones en el hormigón ligero son aproximadamente la mitad de las del hormigón convencional.

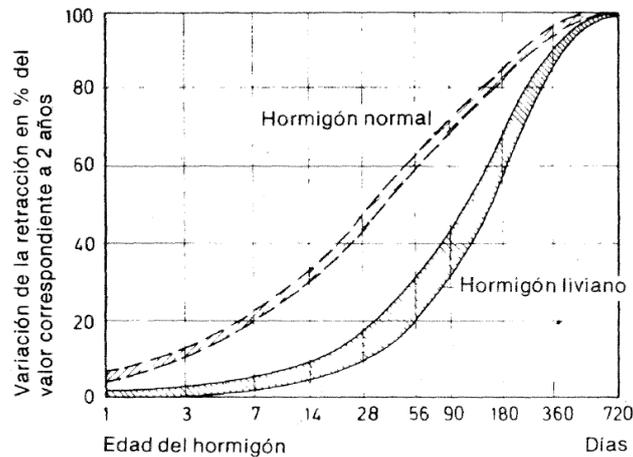


Figura 3.19 Comparativa de la variación en el tiempo de la retracción del hormigón ligero y convencional.

La Figura 3.20 [58] muestra la evolución de la retracción con la edad para hormigones con diferentes contenidos de EPS así como para el hormigón convencional y dos periodos de curado. Se observa que la retracción aumenta con el contenido de EPS de la mezcla y, que con un curado más prolongado se puede reducir la retracción. Debido al curado más prolongado la resistencia y módulo de elasticidad aumentan también gradualmente.

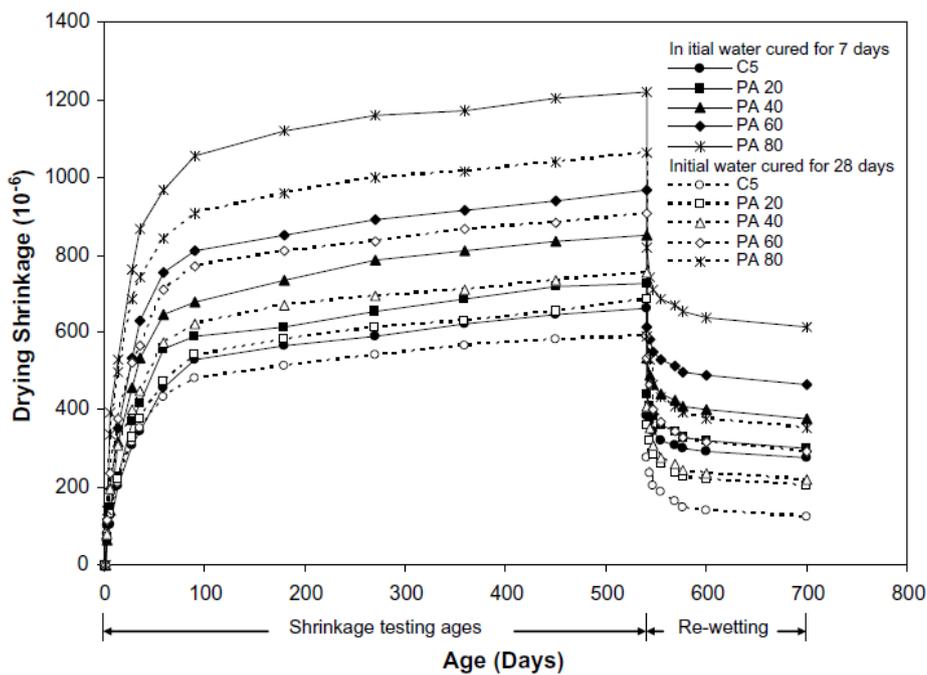


Figura 3.20 Evolución de la retracción en hormigones con cantidades de EPS de 0% (C5) 20% (PA 20), 40% (PA 40), 60% (PA 60) y 80% (PA 80) con dos periodos de curado diferentes.

*Fluencia.* La fluencia del hormigón bajo cargas permanentes es un fenómeno de deformación del hormigón posterior al período de fraguado y está íntimamente relacionado con el comportamiento del mortero. Los áridos se oponen a la deformación de la pasta por su resistencia intrínseca y, como el módulo de Young de los áridos ligeros es menor que el de los áridos naturales, las deformaciones por fluencia son mayores que en los hormigones normales. No obstante, es necesario incidir en que la fluencia es un fenómeno considerado positivo en los hormigones ligeros, ya que reduce las tensiones internas producidas por la retracción tardía y los cambios de temperatura. Sin embargo, en el caso de estructuras pretensadas, el fenómeno de fluencia disminuye la fuerza del pretensado en el tiempo, lo que obliga a un sobredimensionamiento de las estructuras. Como dato importante en este ámbito cabe señalar que el coeficiente de fluencia de los hormigones ligeros varía entre 0,5 y 1,0 veces con respecto al del hormigón normal [46].

### 3.4.5 Conductividad térmica

El aire contenido en la estructura celular del árido ligero reduce la tasa de transferencia de calor en comparación con el árido natural convencional, por tanto, su presencia en la matriz cementicia reduce la conductividad térmica. Por esta razón, las buenas propiedades térmicas del hormigón ligero se han empleado en gran medida para mejorar el aislamiento térmico en edificios y estructuras. La conductividad térmica del hormigón con árido ligero varía principalmente en función de su densidad, tipo de árido y contenido de humedad. Aunque se conoce dicha variación, suele asumirse una relación entre conductividad y la densidad para un contenido de humedad dado del tipo  $k = c^{\lambda}$ , donde  $k$  es la conductividad térmica  $c$  una constante dependiente del contenido de humedad y  $\lambda$  es la densidad seca aparente (Figura 3.21)[43].

### 3.4.6 Durabilidad

El hormigón con árido ligero se ha empleado ya en diversas estructuras como puentes de carretera y, tras varias décadas, se ha comprobado que es capaz de resistir de forma satisfactoria las condiciones meteorológicas igual o mejor que el hormigón convencional. En Japón, se han observado estructuras de hormigón con árido ligero tras 13-20 años de servicio y se comprobó que no se produjo una disminución en la resistencia a compresión, ni en el módulo de elasticidad ni un incremento de la penetración de sales o fisuración. Concluyéndose, por tanto, que el hormigón ligero no era inferior en durabilidad a un hormigón convencional. De hecho, era más determinante la relación agua/cemento que el tipo de árido empleado y, que el árido ligero tenía un mejor comportamiento que el árido convencional a igual relación a/c.

*Ciclos de hielo-deshielo.* Al igual que para el hormigón convencional, el comportamiento del hormigón ligero frente a los ciclos de hielo-deshielo depende principalmente del contenido de la mezcla, el tipo de árido y sus niveles de humedad y aire dentro del mismo. Los ensayos de laboratorio han demostrado que, para la mayoría de áridos, tanto en condiciones de árido premojado y con aire como sin aire en el interior, el hormigón con árido ligero tiene un mejor comportamiento a los ciclos de hielo-deshielo que el hormigón convencional con la misma resistencia. Los hormigones con árido ligero de alta resistencia (54-73 MPa) han demostrado un comportamiento excepcional bajo condiciones de hielo-deshielo. Han sido necesarias condiciones propias del ártico para

causar un daño significativo al hormigón, y el comportamiento depende principalmente del contenido de humedad y de las condiciones de humedad del árido [43].

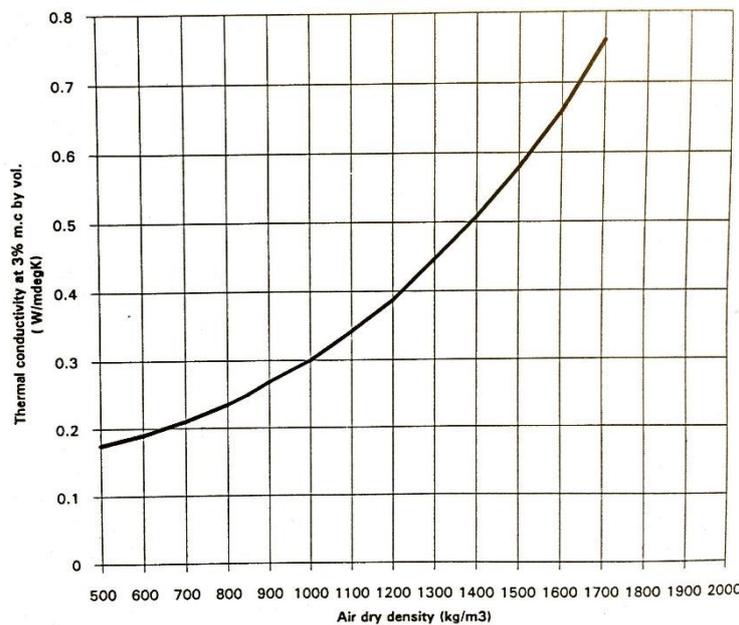


Figura 3.21 Relación conductividad térmica y densidad.

*Permeabilidad.* La permeabilidad de un hormigón es uno de los principales factores para determinar la durabilidad de un hormigón, y esta es la resistencia a la penetración de los iones agresivos. Las características de la absorción representan indirectamente la porosidad, a través del volumen de poros y su conexión, pero permeabilidad y porosidad no son sinónimos. El hormigón con árido ligero no es necesariamente más permeable que el hormigón convencional debido a que los áridos ligeros están rodeados por una matriz con mejor comportamiento debido a: módulos elásticos similares entre árido y matriz, una excelente adherencia de los áridos con la matriz y el efecto de las partículas puzolánicas, mayor hidratación del cemento debido a un mejor curado y el agua contenida en los áridos porosos, y un menor efecto del calor de hidratación [43].

La absorción evaluada según el CEB para hormigones con EPS ha mostrado valores reducidos, debido a la naturaleza no absorbente del árido, lo que indica que es un hormigón de buena calidad. Incluso se observa también que con una mayor cantidad de EPS se reduce la absorción más aún a edades tempranas. En este sentido es favorable también el uso de humo de sílice [70].

*Corrosión.* Un mayor contenido de cemento en los hormigones con árido ligero provoca un entorno altamente alcalino que inhibe la corrosión. Esto junto con el beneficio de una buena compactación, reduce el riesgo de corrosión, sin embargo, un contenido bajo de cemento (menos de 300 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente) puede dar lugar a una corrosión prematura.

El estudio llevado a cabo por [70] evaluó el potencial y la intensidad de corrosión a 90 días en barras de acero embebidas en hormigón con EPS y se obtuvieron tasas de corrosión de 0.010-0.013 mm/año, que son significativamente más bajas que para un hormigón convencional.

### 3.5 Aplicaciones

Entre las aplicaciones más destacables que se han llevado a cabo con el hormigón ligero están la construcción de edificios, rascacielos y puentes, empleando para ello un hormigón con árido ligero estructural como las arcillas expandidas o similares.

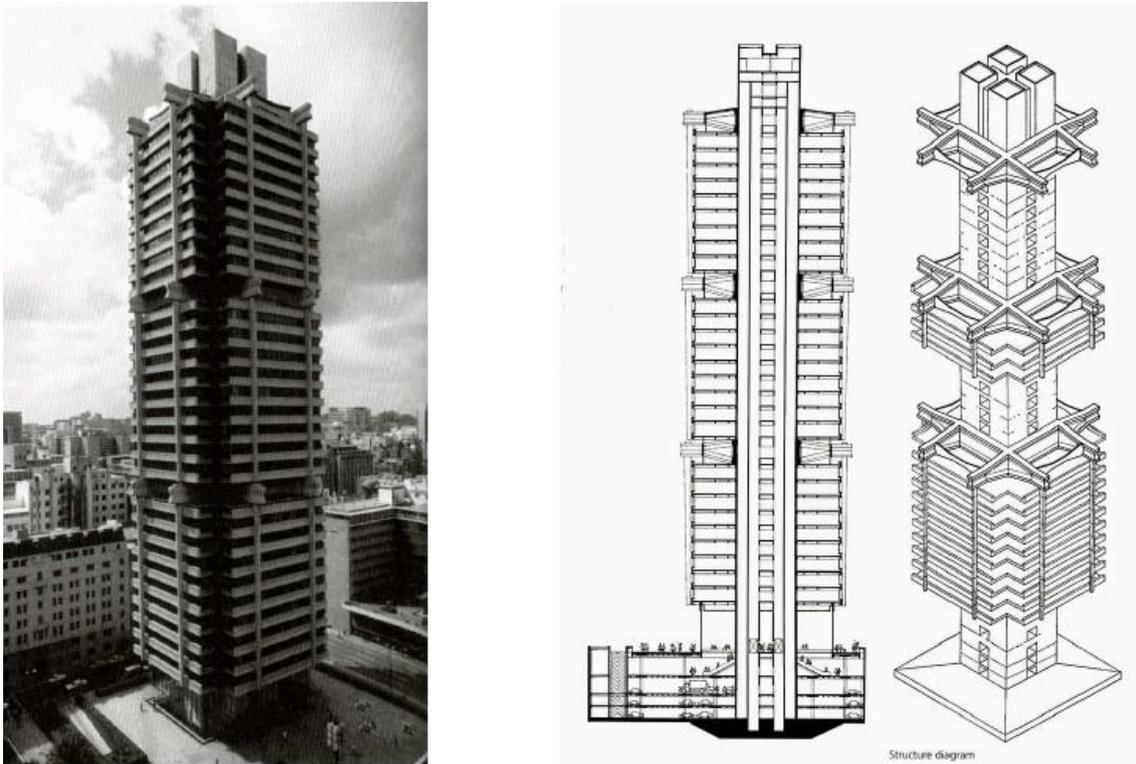


Figura 3.22 Standard Bank, Johannesburgo. (Ove Arup & Partners.)

Los beneficios del hormigón ligero son más significantes en estructuras de media a gran envergadura donde el peso propio se vuelve una de las principales cargas del diseño de la estructura y su cimentación.

#### Standard Bank

Un ejemplo destacable es el Standard Bank en Johannesburgo (Sudáfrica) de 1970, con una altura de 130 metros de altura y 30 pisos. Consta de un núcleo central de hormigón del que se suspenden las losas de los pisos construidas con hormigón ligero para disminuir la carga muerta. Cada losa está construida a partir de 36 vigas doble T prefabricadas de 9.75 m de longitud realizadas de hormigón ligero con árido de “Aglita”, una arcilla expandida, como árido grueso y arena natural. Este hormigón ligero tubo la resistencia requerida de 21 MPa a los 28 días y una densidad de  $1950 \text{ kg/m}^3$ , incluso en algunas vigas se obtuvieron resistencias mayores de hasta 31 MPa [43],[92].

#### Edificio Torre Picasso

Otro ejemplo más cercano en tiempo y espacio es el edificio de Torre Picasso en Madrid inaugurado en 1989. Se trata de una construcción de 157 metros de altura (171 metros si se mide desde el sótano más bajo) con 45 plantas diáfanas rectangulares de  $38 \times 50$  metros y 5 sótanos.

La estructura mixta del edificio combina el hormigón armado en su base con pilares y vigas metálicas hasta su coronación. Los forjados se constituyen con chapa metálica y hormigón ligero. El edificio contiene 3500 m<sup>3</sup> de hormigón con árido ligero que fue bombeado y presentaba una resistencia a compresión de 45 MPa y densidad de 1650 kg/m<sup>3</sup>. Toda la estructura está protegida contra el fuego mediante mortero ignífugo. Esta estructura permite la creación de grandes espacios diáfanos para un mejor aprovechamiento de su distribución.

Básicamente la estructura es muy simple, se reparten las cargas que debe soportar el edificio, incluidos movimientos sísmicos y viento, entre el cubo hueco que forman los cuatro lados de la fachada construida con columnas de acero continuas y un núcleo central también constituido por pilares de acero, relacionándose las estructuras verticales internas y externas a través de vigas horizontales en las plantas. Esta estructura debería resistir incluso el impacto de un avión y un fuego convencional durante un par de horas.

### Puente Boknasundet

El puente Boknasundet construido en 1990-1991 cerca de Stavenger en el suroeste de Noruega es uno de los de mayor vano, 190 m, construido con hormigón ligero. Está formado por tres vanos

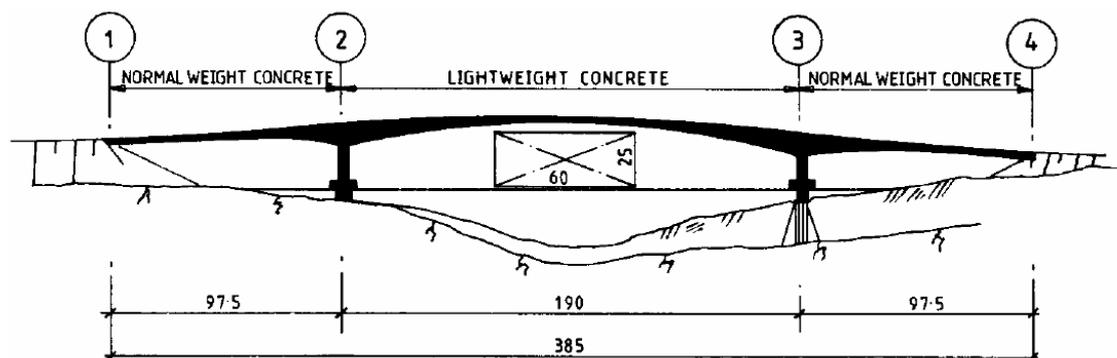


Figura 3.23 Puente Boknasundet, vista esquemática

de 97.5 m, 190 m y 97.5 m como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.23, de los cuales el vano central, el más largo, está construido con árido ligero Liapor y los otros dos vanos de aproximación con hormigón de densidad convencional.

El diseño original propuesto por el propietario (Departamento de Carreteras) era de hormigón de densidad convencional y consistía en un vano central de 150 m y dos vanos de aproximación a cada lado de 35 m y 85 m. La alternativa de hormigón ligero que finalmente se llevó a cabo reducía el coste total estimado un 6.5% respecto a la propuesta del propietario. La muestra la dosificación y resistencia del hormigón ligero empleado para el vano central.

Tabla 3.9 Dosificación del hormigón empleada en el puente Boknasundet.

CEM I	Agua	Microsilíce	Arena 0-8 mm	Liapor 4-8 mm	Liapor 8-16 mm	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)
430	190	25	680	334	265	1950	63.4

Unidades: kg/m<sup>3</sup>

El hormigón con poliestireno (EPS) se conoce bien por sus buenas propiedades acústicas y térmicas, utilizándose principalmente con fines no estructurales incluyéndose el uso como paneles prefabricados en cubiertas y como bloques de bovedillas. Se ha considerado también su uso como núcleo en paneles tipo sándwich, vigas y losas, como material para la sub-base en pavimentos de carretera o vías ferroviarias, en estructuras marinas flotantes, como defensa de plataformas petrolíferas, como material para disipar la energía en la protección de estructuras militares enterradas, rascacielos e incluso puentes de grandes luces [56],[70],[73],[93].



Figura 3.24

### 3.6 Conclusiones

Algunas de las principales características del hormigón ligero son:

1. Ligereza: se puede lograr una reducción de densidad respecto al hormigón convencional de hasta el 50%, lo que supone una disminución de la carga debida al peso propio o carga muerta. Esto permite reducir también costes de transporte en el caso de piezas prefabricadas.
2. Aislamiento: el hormigón ligero tiene una conductividad térmica menor ( $0,1-0,7 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ) a la del hormigón convencional ( $1,63 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ), lo que lo convierte en un material que puede colaborar en el aislamiento de los cerramientos que deben alcanzar valores de unos  $0,20 \text{ W/m}^\circ\text{K}$  para un espesor de 25 a 30 cm.
3. En el caso del hormigón celular, también es fácil de cortar, serrar, clavar o incluso fresar. Hay sierras para hormigón celular.
4. Utilizando residuos de EPS para fabricar hormigón no solo ayuda en el almacenamiento de residuos, sino que también ayuda a reciclar y preservar los recursos naturales.

La dosificación de un hormigón ligero no puede realizarse de la misma forma que para un hormigón convencional fundamentalmente por dos motivos:

1. La consistencia del hormigón ligero depende en gran medida del tipo de árido empleado, los áridos expandidos con superficie porosa es aconsejable saturarlos antes de realizar la mezcla y determinar el contenido de agua libre. Para áridos de plástico (PET, PET) depende de la forma del árido y su tamaño [70], de forma que los áridos finos redondeados mejoran la trabajabilidad [56],[90] y las formas irregulares y angulosas (botellas PET simplemente trituradas) la disminuyen [67], [86] (Figura 3.25).

2. Los áridos ligeros son más propensos a la segregación por flotación, especialmente aquellos más ligeros como las partículas de EPS. Para ello es recomendable el uso de superplastificantes, una puesta en obra cuidada o incluso optar por la compactación manual.

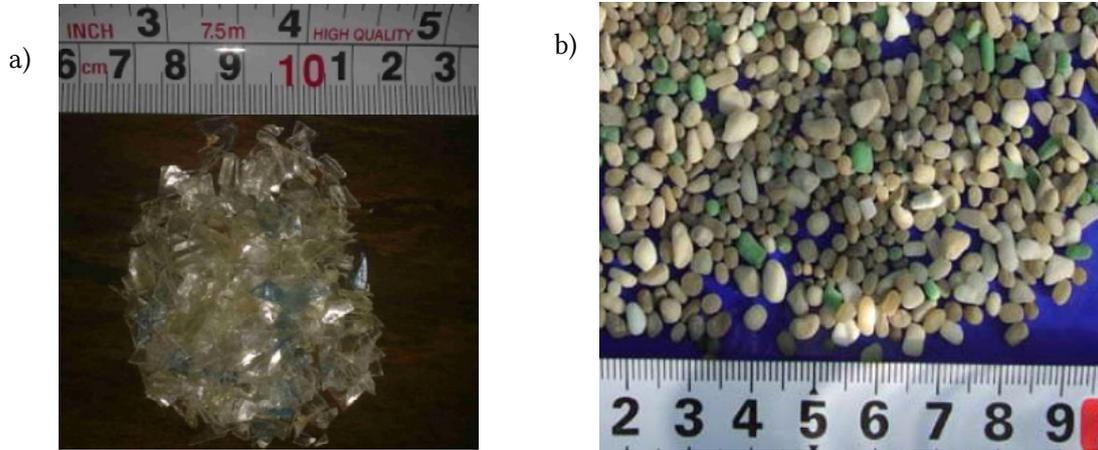


Figura 3.25 Partículas angulosas de PET reciclado (a) y redondeadas cubiertas por escoria de alto horno (b).

3. La resistencia del hormigón ligero depende en gran medida del mortero empleado, pero también influye la resistencia del árido empleado, por tanto, se recomienda realizar ensayos para diseñar la dosificación adecuada.
4. Debido al menor módulo E de los hormigones ligeros, la retracción es mayor, aunque debido a la porosidad y mayor absorción de los áridos el curado es mejor y la retracción se retrasa en el tiempo, lo que supone un efecto favorable incorporando dichas tensiones cuando la resistencia del hormigón es mayor.
5. La durabilidad de los hormigones ligeros ha demostrado no ser inferior a la de los hormigones convencionales e incluso en algunos aspectos, como la corrosión, el hormigón con EPS presentó tasas inferiores [70].

## Capítulo 4. Hormigón autorreparable

### 4.1 Introducción

El hormigón es uno de los principales materiales de construcción por sus múltiples beneficios tales como su bajo precio, polimorfismo, resistencia a compresión, compatibilidad con la armadura etc. No obstante, todos los materiales presentan un deterioro frente al paso del tiempo que se manifiesta de diferentes modos según el material. El hormigón, inevitablemente y debido a las tensiones acaba teniendo fisuras por las que se puede filtrar el agua que una vez alcanza las armaduras comienza un proceso de corrosión a partir del cual se reduce la vida de la estructura. Esto requiere unos trabajos de reparación y mantenimiento intensivos, tanto en mano de obra como en capital. Los tratamientos que existen para reparar estas fisuras tienen un carácter puntual y de corto plazo, además de que algunos de los químicos y polímeros empleados pueden tener riesgos sobre la salud y el medio ambiente.

Los métodos para tratar las fisuras en el hormigón generalmente se dividen en tratamientos activos y pasivos. Los tratamientos pasivos solamente pueden reparar las fisuras superficiales, mientras que los métodos activos pueden reparar tanto las fisuras exteriores como las interiores. Para mejorar la durabilidad del hormigón y prevenir la penetración de agentes agresivos en el interior del hormigón, se pueden emplear tratamientos pasivos consistentes en cubrir el exterior con una sustancia basada en productos químicos y polímeros. Así mismo, se pueden inyectar o rociar sellantes en las fisuras que se observen. Estos sellantes generalmente se componen de materiales químicos como resinas epóxicas, gomas cloradas, ceras, poliuretano, acrílicos y siloxano. Algunas limitaciones de estos tratamientos son su baja resistencia a las condiciones atmosféricas, sensibilidad a la humedad, baja resistencia al calor y coeficientes de dilatación diferentes entre el hormigón y los sellantes.

Los tratamientos activos son conocidos también como técnicas de autorreparación, autosoldadura o autocuración, y pueden activarse de forma autónoma en diferentes condiciones independientemente de la posición de la fisura. Es decir, tienen la capacidad de activarse automáticamente en el instante en que se produce la fisura y cerrarla. Llegados a este punto, cabe diferenciar entre aquellos materiales que hacen función de sellado, es decir, que cubren la fisura para evitar la exposición al ambiente y que consisten generalmente en tratamientos pasivos, y aquellos que tienen la función de reparación de forma que se restauran total o parcialmente las características iniciales del hormigón (tratamientos activos) [94]. Existen diferentes formas en las que se genera el mecanismo de autorreparación, que principalmente son los siguientes:

- *Reparación autógena*: proceso que ocurre naturalmente en el hormigón convencional debido a la hidratación de las partículas de cemento no hidratado o carbonatación del hidróxido de calcio disuelto (Figura 4.1).

- *Fibras huecas*: se trata de incorporar a la mezcla de hormigón fibras huecas que contienen componentes reparadores. Por tanto, cuando se fisura la pieza y estas fibras se rompen, liberan el contenido y comienza la reparación de la grieta.
- *Microencapsulación*: consiste en una técnica mediante la cual se encapsulan sustancias autorreparantes o sellantes en pequeñas esferas o fibras huecas que se liberan tras romperse la cubierta al producirse la fisura en el hormigón.
- *Biomíneralización*: se trata de la reparación a través de las bacterias que permanecen latentes en el hormigón y se activan cuando entran en contacto con la humedad necesitando alimento como el lactato de calcio para producir carbonato cálcico y sellar las fisuras.

El tratamiento ideal debería tener calidad, una vida extensa, capacidad de penetración y capacidad para actuar en sucesivas reparaciones de forma ilimitada [95], [94]. De acuerdo a la literatura existente, pueden darse diversos mecanismos que causan el fenómeno de la autorreparación autógena como son [96] (Figura 4.1):

- a) Formación de carbonato cálcico o hidróxido de calcio en forma de cristales.
- b) Obstrucción de las grietas por acumulación de impurezas del agua y partículas sueltas de hormigón producto de la fisuración.
- c) Hidratación del cemento no hidratado dentro del hormigón o de los materiales cementicios que no han reaccionado.
- d) Expansión de la matriz cementicia hidratada en los bordes de la grieta (hinchamiento de C-S-H)

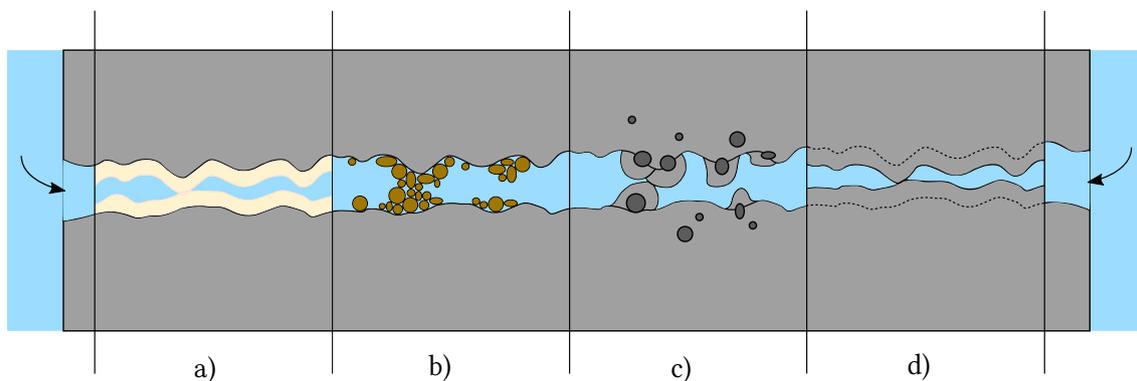


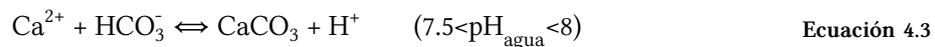
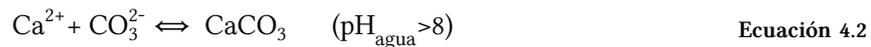
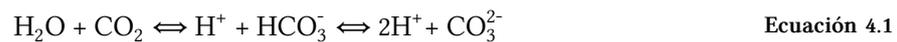
Figura 4.1 Posibles mecanismos de autorreparación autógena.

Aunque en este trabajo no se vayan a tratar, existen unos materiales de base cementicia u “hormigones” muy adecuados para que se produzca la autorreparación y son los Compuestos Cementicios de Diseño o ECC por sus siglas en inglés (Engineered Cementitious Composite) también conocidos como hormigones flexibles. En muchos aspectos este material tiene las mismas características que un hormigón de media a alta resistencia. Sin embargo, tiene una ductilidad y una capacidad de deformación mucho mayores de entre 3 a 7% en comparación con el 0.01% del hormigón convencional. Esto se logra mediante la adición de fibras en una cantidad no mayor al 2% [97]. A diferencia de los hormigones reforzados con fibras son diseñados en base a la mecánica de la fractura con fibras cortas discontinuas hechas con diferentes polímeros. La interacción de éstas fibras con la matriz cementicia evita que se formen grandes grietas como en el hormigón convencional y

se formen muchas microfisuras con un ancho muy específico [98]. Esto además de permitir la deformación sin romperse completamente, provoca que la autorreparación en presencia de humedad y el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera sea muy favorable por el reducido tamaño de las fisuras formadas [99].

#### 4.1.1 Reparación autógena

Aunque se han mencionado cuatro tipos de reparación autógena o sellado, el principal mecanismo de autorreparación se asocia a la cristalización del carbonato cálcico y, a edades muy tempranas, puede predominar la hidratación de los materiales cementicios no hidratados. Esto se puede comprobar al observar las caras exteriores de la grieta en donde aparecen un residuo blanco que es el carbonato cálcico hidratado, el cual se puede observar en la Figura 4.2 a nivel macroscópico (a, [100]) y a nivel microscópico (b, [101]). Una vez que los productos de hidratación del cemento se disuelven en el agua, el hidróxido de calcio se libera y se deposita sobre las superficies de la grieta. Después los iones de calcio libres ( $\text{Ca}^{2+}$ ) de la hidratación del cemento reaccionan con el  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua, formándose cristales en las superficies de la grieta que rellenan y acaban por repararla. El proceso de la reacción química se puede describir de la siguiente manera [96]:



La reparación autógena sucede naturalmente en el hormigón natural y es conocida de hace tiempo, sin embargo, su capacidad está limitada a un determinado ancho de grieta que como máximo es aproximadamente 0.2 mm [102] que según la BS 8007 se puede cerrar en 28 días [103].

Lauer y Slate [115] concluyeron de sus ensayos que la relación agua cemento solo influía a edades tempranas (1-7 días) en el efecto de la reparación, siendo más eficaz a mayor relación. Además, observaron que, una vez soldadas las fisuras bajo el agua, el secado producía una reducción considerable de la resistencia. Es decir, que solo se logra una reparación adecuada si se mantiene

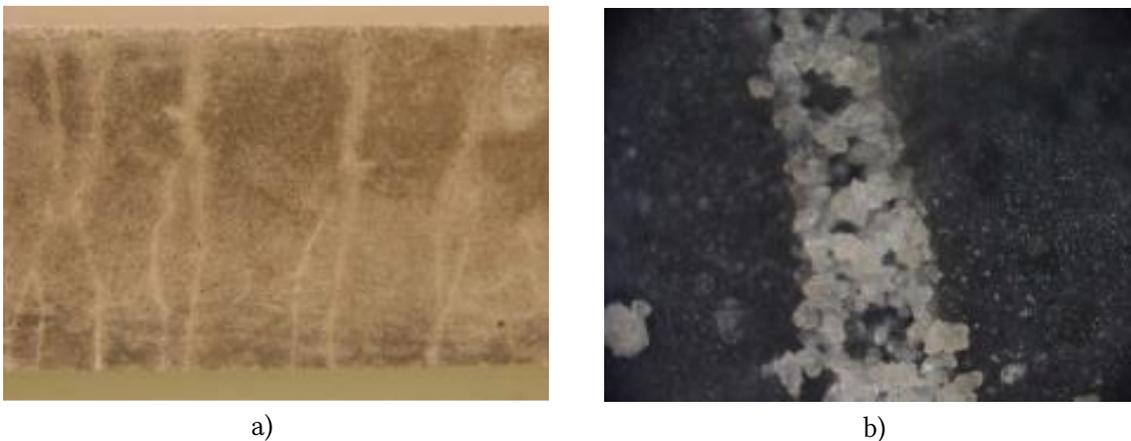


Figura 4.2 Residuo blanco de carbonato cálcico depositado en las grietas observado a nivel (a) macroscópico y (b) microscópico (profundidad de fisura 100  $\mu\text{m}$ )

constantemente húmedo el hormigón. Esto se supone que se debe a la retracción que experimenta el hormigón al secarse que rompe el débil enlace formado.

#### 4.1.2 Condiciones para la autorreparación

Las condiciones que se deben de producir para que se produzca la autorreparación en el hormigón son cinco y se mencionan a continuación [104]:

- 1) *Presencia de agua*: todos los ensayos determinan que la presencia de agua es esencial para que se produzca la reparación de las fisuras. Sin agua, es imposible que el hidróxido de calcio se libere del hormigón hacia la grieta.
- 2) *Presencia de sustancias químicas*: la concentración adecuada de determinadas sustancias químicas como los iones carbonato o bicarbonato y los iones de calcio libres disueltos en el agua, juegan un papel principal en el proceso de autorreparación. Este proceso es posible debido a la composición química de los materiales cementicios y una hidratación incompleta.
- 3) *Abertura de fisura*: es una condición importante a controlar, la cual está asociada a la eficacia de la autorreparación de los materiales cementicios. La apertura de fisura para poderse producir la autorreparación debe ser menor de 150  $\mu\text{m}$  y preferiblemente menor a 50  $\mu\text{m}$  [105]. A menor abertura la cantidad de productos requeridos para cerrar la fisura es menor y es más sencillo que crezcan para conectar ambas superficies de la fisura.
- 4) *Presión de agua*: si existe un flujo de agua rápido a través de la fisura, no se producirá la autorreparación. Por tanto, la presión de agua no debe ser excesiva esta condición está influenciada por la relación entre la altura de agua y el espesor de la estructura para un determinado ancho de fisura.
- 5) *Estabilidad de la fisura*: para garantizar que la fisura no se vuelva a dañar de nuevo, la fisura debe permanecer en condiciones estables y la apertura de fisura permanecer constante en lugar de variar con el tiempo.

### 4.2 Tipos de hormigones autorreparables

Los distintos tipos de hormigones autorreparables o autosoldables que se pueden encontrar en la literatura actualmente se diferencian por el sistema que emplea para incorporar dicha propiedad. Al comienzo del capítulo se mencionaron tres principales formas en que se logra la autorreparación: reparación autógena, microencapsulación y reparación biológica. La reparación autógena se produce naturalmente en el hormigón convencional bajo determinadas condiciones descritas anteriormente y, las otras dos, se logran mediante la incorporación a la mezcla de hormigón de determinadas adiciones, las cuales se describirán a continuación.

#### 4.2.1 Fibras huecas

La idea de incorporar fibras huecas (Figura 4.3 (a) [104]) en el hormigón como un tratamiento activo de protección o autorreparación se fundamenta en almacenar en dichas fibras componentes que puedan reparar el hormigón una vez fisurado. Por tanto, cuando se produce un daño o fisura en el hormigón, estos componentes o agentes reparadores se liberan del interior de las fibras hacia

la fisura para repararla a modo de *sangrado* (Figura 4.3 (b) [106]). El concepto es similar a cómo funcionan las arterias en un organismo natural y se ha estudiado con diferentes tamaños de fibras, así como en matrices de diferentes materiales como compuestos poliméricos dando buenos resultados.

Diversos autores han demostrado experimentalmente la viabilidad de emplear el concepto de la autorreparación en matrices cementicias. Dry [107] adaptó el concepto de la autorreparación biológica presente en la naturaleza mediante el sangrado, para su aplicación en el hormigón. La idea implica almacenar componentes reparadores dentro de unos recipientes frágiles distribuidos en el

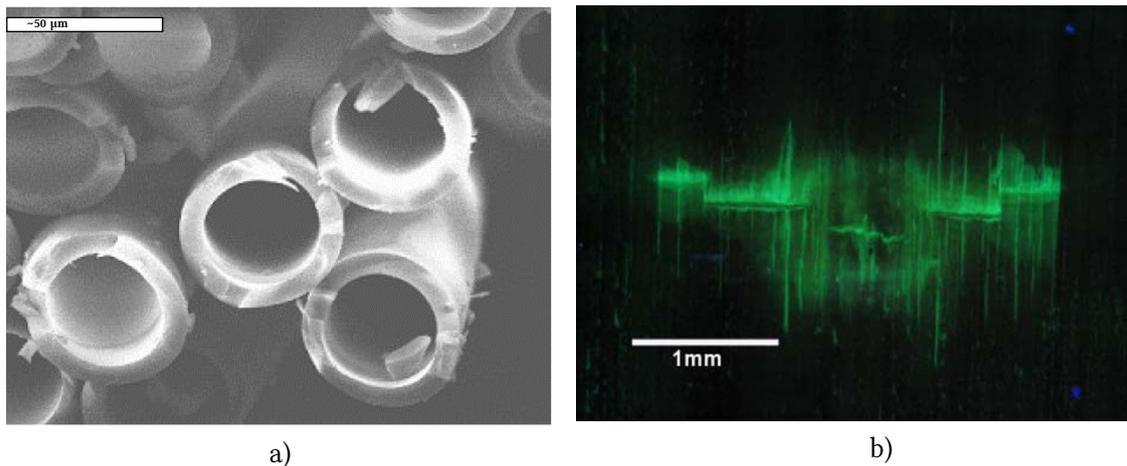


Figura 4.3 (a) Fibras de vidrio huecas y (b) efecto que producen las fibras por el sangrado en las fisuras producidas visto con la ayuda de tinta fluorescente.

hormigón que se liberarán cuando se produzca la rotura del recipiente como consecuencia de un daño en el hormigón. Para ello empleó por un lado fibras de polipropileno que contienen metacrilato de metilo (MAM) y que actúa cuando una fuente de calor funde una cubierta de cerumen que libera el contenido sirviendo, además, para polimerizar el metacrilato de metilo, denominándose el procedimiento modo activo. Por otro lado, empleó otro modo pasivo, el cual emplea fibras de vidrio huecas que contienen adhesivos. Los adhesivos se introducen en la grieta una vez que las fibras se rompen.

#### 4.2.2 Microencapsulación

La encapsulación de sustancias u organismos es un sistema que se encuentra en la naturaleza tanto a nivel macroscópico, como huevos o semillas, como a nivel microscópico en las células que guardan su contenido. El desarrollo de la microencapsulación empieza con la preparación de las cápsulas que contienen tintas, éstas eran incorporadas al papel con la finalidad de realizar copias y reemplazar al papel carbón o papel de calco [96]. Con el tiempo, surgieron diversas nuevas técnicas que se han ido desarrollando en numerosos campos. La microencapsulación se define como un proceso mediante el cual se encapsula una sustancia sólida, líquida o gaseosa en una celda microscópica inerte que aísla y protege de un ambiente con el que no se desea que reaccione.

#### 4.2.2.1 Técnicas de microencapsulación

Existen diversas técnicas para la encapsulación de materiales reactivos. Estas técnicas se pueden clasificar como interfacial, in situ, coacervación, dispersión fundible o física basada en el mecanismo de formación de pared. Para los materiales autorreparables, las técnicas más comunes de encapsulación son in situ, interfacial, y dispersión fundible. La encapsulación in situ e interfacial se realizan mediante la reacción de polimerización de un monómero (urea-formaldehído, melanina-formaldehído, poliuretano, o acrilatos [108]) en la interfase de dos sustancias inmiscibles, formando una membrana que dará lugar a la pared de las microcápsulas. Este proceso tiene lugar en tres pasos [109]:

1. Dispersión de una solución acuosa de un reactante soluble en agua, en una fase orgánica para producir una emulsión agua en aceite.
2. Formación de una membrana polimérica en la superficie de las gotas de agua, iniciada por la adición de un complejo soluble en aceite a la emulsión anterior.
3. Separación de las microcápsulas de la fase orgánica y su transferencia en agua para dar una suspensión acuosa. La separación de las microcápsulas se puede llevar a cabo por centrifugación.

La dispersión fundible consiste en la dispersión de un núcleo activo en un polímero fundible. El polímero fundible es emulsionado para formar gotas y son solidificadas por cambios de temperatura o eliminación del solvente para formar una esfera protectora alrededor del núcleo [108].

#### 4.2.2.2 Aplicación

La aplicación de la microencapsulación para incorporar componentes reparadores en materiales autorreparables fue demostrada por White et al. [110] para el caso de un material polimérico. La Figura 4.4 (a) [110] ilustra el concepto de la autorreparación mediante la microencapsulación. Cuando la fisura alcanza y rompe las microcápsulas, el agente reparador se vierte a las superficies de la fisura mediante la capilaridad. Después el agente reparador contacta con el catalizador presente en la matriz y comienza la polimerización que termina por cerrar y unir las superficies de la fisura. Una ruptura típica de una microesfera se muestra en la Figura 4.4 (b) [110].

White et al. [110] obtuvieron unas cápsulas con un diámetro promedio de 220  $\mu\text{m}$  realizadas de urea-formaldehído (resina) y un agente polimérico como material para la reparación de la grieta. Pelletier et al. [111] emplearon para fabricar un hormigón autorreparable microcápsulas de poliuretano con un agente reparador que consiste en silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Este reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) presente en el hormigón para crear un gel de silicato de calcio hidratado (CSH) que endurece en una semana, rellena la fisura y bloquea los poros. Con un 2% de adición de estas micropartículas se obtiene hasta un 26% de recuperación de la resistencia original en el hormigón.

La microencapsulación también se ha utilizado para mejorar la hidratación del hormigón incorporando agua y otros aditivos incorporados, para mejorar la resistencia al fuego, ciclos de hielo y deshielo, reducción del calor de hidratación etc. [96].

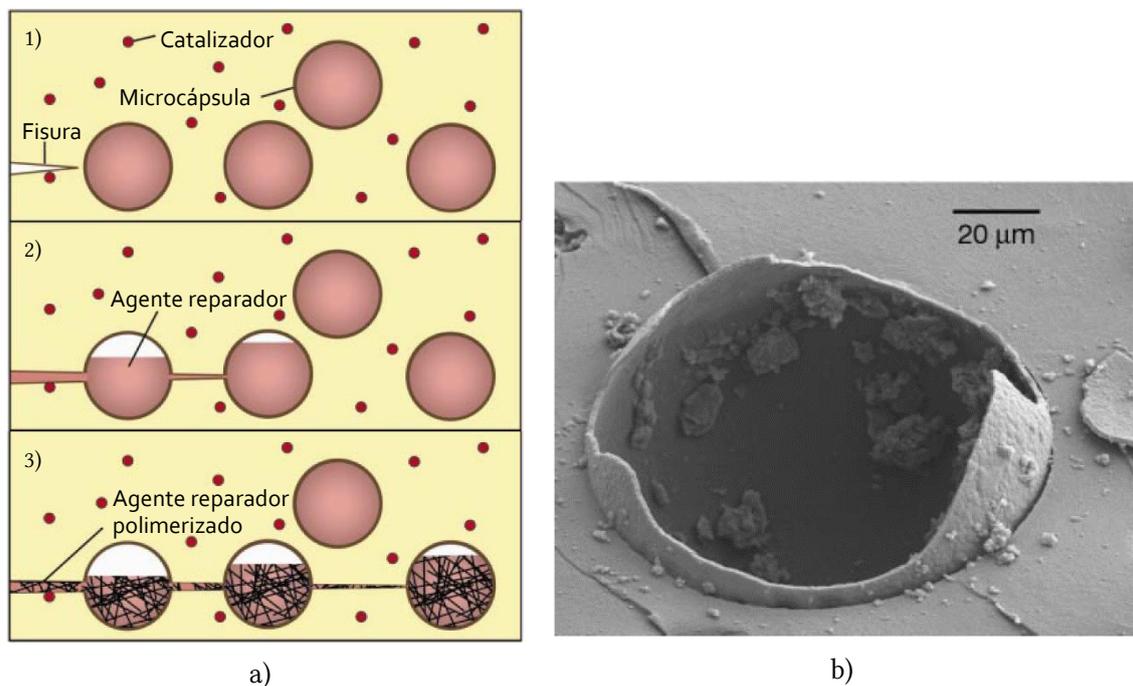


Figura 4.4 (a) concepto de la microencapsulación: (1) Formación de la fisura en la matriz; (2) la fisura alcanza y rompe las microcápsulas, vertiendo el agente reparador en la fisura por capilaridad; (3) el agente reparador contacta con el catalizador y comienza la polimerización que une la fisura y (b) imagen del SEM de una microcápsula rota.

#### 4.2.2.3 Inconvenientes

Por otro lado, la microencapsulación en el hormigón es un método de autorreparación que lo hace difícilmente aplicable para su comercialización por diversas razones. Las principales razones se pueden resumir a continuación:

- Dificultad para que se produzca el endurecimiento del agente reparador que se debe producir con la reacción de dos componentes (agente y catalizador). Sería más adecuado que solo se necesitase un único componente contenido en las microcápsulas.
- La cantidad de la sustancia reparadora en las microcápsulas es muy pequeña y se debe procurar que exista la suficiente como para que las fisuras puedan cerrarse completamente.
- La resistencia de la unión entre las microcápsulas y la matriz debe ser mayor que la resistencia de las microcápsulas, de forma que se tiene que mejorar la unión entre las microcápsulas y la matriz de cemento.
- Los materiales empleados que rellenan la fisura no tienen la misma composición que el hormigón y no se comportan de igual forma, de manera que en ocasiones pueden dar lugar a un incremento de las fisuras existentes [94].
- Las microcápsulas deben proteger el agente reparador durante un largo periodo de tiempo y no tener influencia en la trabajabilidad y propiedades mecánicas del hormigón [94].

### 4.2.3 Biomineralización

La biomineralización se refiere a un proceso de formación mineral a partir de organismos vivos el cual es un fenómeno extendido en la naturaleza. La biomineralización se puede producir mediante un proceso inducido biológicamente. Esto ocurre normalmente en el ambiente exterior como una consecuencia de una actividad metabólica microbiana. En este proceso se forman biominerales a través de reacciones de productos metabólicos generados por microorganismos con el ambiente [94].

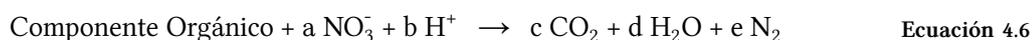
La utilización de bacterias para producir la precipitación de carbonato cálcico y reparar así las fisuras es un método novedoso y libre de contaminantes propuesto por el microbiólogo Jonkers et al. [112]. Anteriormente, Gollapudi et al. [113] se había planteado la idea como un método de intervención para reducir la porosidad de estructuras altamente permeables en formaciones rocosas así como de canales permeables. Zhong e Islam [114] emplearon bacterias en una solución acuosa para tratar las grietas y rellenarlas. Las bacterias son capaces de producir diversos tipos de minerales como carbonatos, sulfuros, silicatos y fosfatos [94]. Sin embargo, el carbonato cálcico es uno de los compuestos más adecuados para el hormigón debido a la alta compatibilidad con los demás componentes cementicios. El carbonato cálcico se puede precipitar a través de una mineralización biológica en presencia de una fuente de calcio. En este proceso el carbonato es producido por microorganismos extracelularmente a través de dos rutas metabólicas denominadas autótrofa y heterótrofa [94].

#### 4.2.3.1 Selección de la bacteria

Las bacterias como *Bacillus sphaericus* y *Bacillus pasteurii* (o *Sporosarcina pasteurii*) son encima capaces de producir biominerales a través de una reacción metabólica en presencia de una fuente de calcio. Estos organismos ureasa positivo están involucrados en el ciclo del nitrógeno y pueden producir carbonato cálcico a través de la hidrólisis de la urea. Las reacciones fundamentales para producir el carbonato cálcico se muestran a continuación [94]:



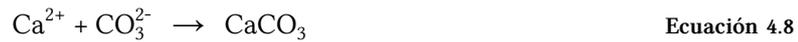
Otra ruta metabólica para producir minerales es conocida como reducción desasimilatoria del nitrato. La desnitrificación (Ecuación 4.6) se define como un proceso respiratorio que reduce el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), óxido nítrico ( $\text{NO}$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y gas nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) [94]. Los minerales se precipitan a través de la oxidación de compuestos orgánicos por reducción del nitrato mediante la bacteria desnitrificante. La característica más importante de esta ruta es su aplicación en ambientes anaerobios. Como consecuencia de la desnitrificación, se produce  $\text{CO}_2$ , agua y nitrógeno.



El consumo de ( $H^+$ ) durante la desnitrificación produce un incremento del pH, lo que da lugar a la producción de carbonatos o bicarbonatos según la Ecuación 4.7:



La reacción final entre la fuente de calcio y el carbonato da lugar a la precipitación del carbonato cálcico (Ecuación 4.8).



Sin embargo, las anteriores rutas metabólicas produce iones de amonio  $\text{NH}_4^+$  a través de la actividad ureolítica que se traduce en la emisión de óxidos de nitrógeno a la atmósfera, concretamente un tercio del nitrógeno producido por una persona en un día por  $\text{m}^3$  de hormigón. Además una cantidad excesiva de amonio en el hormigón incrementa el riesgo de daño por sales por las conversión a ácido nítrico [94], aumenta el riesgo de corrosión de las armaduras [112] y compromete la durabilidad del hormigón [84].

Para evitar los inconvenientes asociados a los iones amonio producidos por la ureólisis, Jonkers et al. [112] propone un método alternativo basado en la conversión metabólica de un componente orgánico (sal orgánica) a carbonato cálcico. La bacteria elegida debe resistir en un ambiente altamente alcalino como el hormigón durante un largo periodo de tiempo y activarse, a su vez, cuando se la requiera para producir carbonato cálcico. Para ello, se propone una bacteria alcalófila, capaz de formar esporas (Figura 4.5, a) [115]) y que resiste en un ambiente aeróbico [112]. Las esporas son células bacterianas latentes con una forma característica compacta y redonda con un tamaño de  $0.8\text{-}1 \mu\text{m}$  (Figura 4.5, b) [112]). Las esporas pueden tener viabilidad hasta un periodo de 200 años y, cuando las condiciones le son favorables (presencia de agua, nutrientes y oxígeno) estas esporas germinan y se desarrollan como bacterias vegetales activas [116].

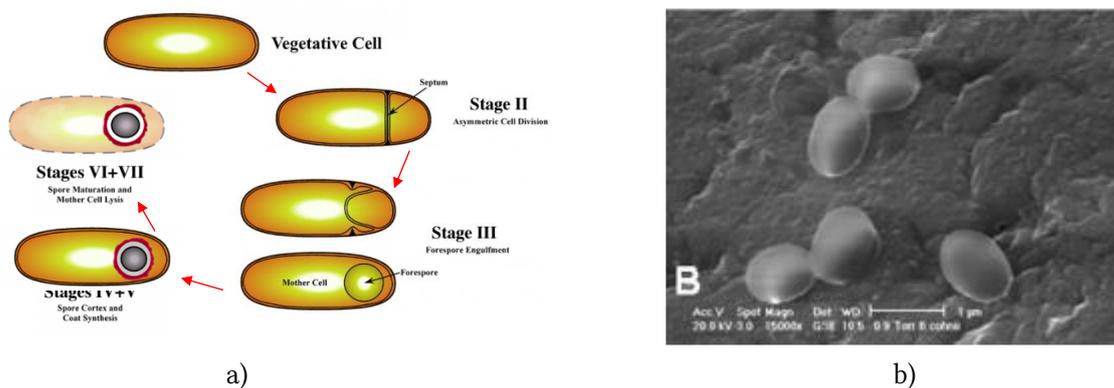
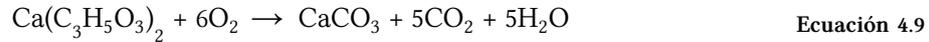


Figura 4.5 (a) Proceso de esporulación de una bacteria; (b) Esporas de *B. Cohnni* al microscopio.

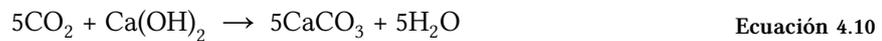
Entre las bacterias posibles se pueden encontrar *Bacillus pseudofirmus*, *Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus cohnii* y *Bacillus halodurans* [117]. Aunque la bacteria que mayor producción de esporas útiles ha demostrado tener en el ensayo es *Bacillus pseudofirmus* [117], una bacteria que vive

naturalmente en los lagos altamente alcalinos que se encuentran en las proximidades de los volcanes. Los minerales producidos basados en el carbonato cálcico se deben a la reacción metabólica del lactato de calcio de acuerdo a la siguiente reacción:



Es decir, la conversión metabólica de la bacteria de 1 mol de lactato de calcio ( $\text{Ca}(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$ ) genera 1 mol de  $\text{CaCO}_3$  y 5 moles de  $\text{CO}_2$  según la fórmula anterior (Ecuación 4.9).

Por tanto, el agente autorreparador consta de dos componentes, la bacteria encargada de realizar la metabolización y el alimento de dicha bacteria, el lactato de calcio. El rendimiento de los carbonatos cálcicos puede aumentar por la reacción que tiene lugar entre las moléculas de  $\text{CO}_2$  y la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), la cual es uno de los principales productos de la hidratación del cemento, según la siguiente fórmula:



La reacción anterior (Ecuación 4.10) es homóloga a la carbonatación, un proceso lento que ocurre naturalmente en el hormigón debido a la difusión del  $\text{CO}_2$  atmosférico en el interior del hormigón. Dicho proceso se acelera sustancialmente debido a la conversión metabólica del lactato de calcio [112] que incrementa el  $\text{CO}_2$  disuelto en el hormigón. A medida que la autorreparación progresa, se reduce la cantidad de reactivos internos como la portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o anhídrita en las proximidades de la grieta y se forma una capa densa, formada principalmente de carbonato cálcico, en la porosidad y el volumen interno de la grieta. Este frente compacto autorreparado frena la difusión de la pasta circundante con el volumen de la grieta y, además, frena la difusión de los reactivos externos como el  $\text{CO}_2$  y el agua [118]. Por otro lado, aunque la corrosión en el acero es muy sensible al pH, si el entorno del acero se mantiene seco (humedad relativa por debajo de 70%) la tasa de corrosión es despreciable en el hormigón carbonatado [119]. Además, los efectos de la corrosión a largo plazo en grietas con una anchura menor a 0.2 mm son reducidos [119].

#### 4.2.3.2 Selección del nutriente

El lactato de calcio mencionado anteriormente es el nutriente más adecuado según los estudios llevados a cabo por Jonkers et al. [112]. Para ello analizaron diversos componentes orgánicos como el extracto de levadura, la peptona, el acetato de calcio y el lactato de calcio. Los autores observaron que la mayoría de los componentes provocaban una significativa reducción en la evolución de la resistencia del hormigón, mientras que el lactato de calcio incluso provocaba un ligero incremento a los 28 días.

Otras veces además del lactato de calcio se pueden emplear otros nutrientes como el extracto de levadura, acetato de calcio, peptona [112] o glutamato de calcio [120]. Si en lugar de metabolizar sales orgánicas, se utilizan bacterias ureolíticas o desnitrificantes, se utiliza también el extracto de levadura pero además se añade urea y otras nutrientes como cloruro de calcio [121] o nitrato de calcio [122],[123].

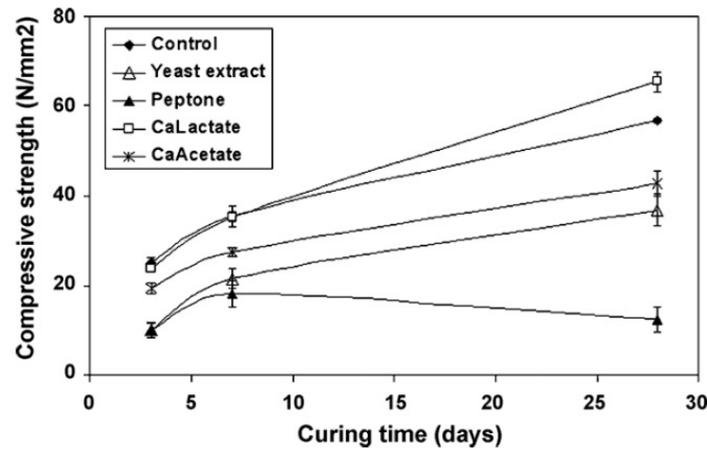


Figura 4.6 Desarrollo de la resistencia a compresión con la edad de hormigones con distintos tipos de componentes orgánicos.

#### 4.2.3.3 Durabilidad de las bacterias

Las bacterias pueden permanecer latentes en el hormigón hasta 200 años en disposición para activarse cuando entren en contacto con la humedad. Sin embargo, Jonkers et al. [112] observaron que con la edad del hormigón se produce una pérdida de la viabilidad de las esporas de las bacterias incorporadas en el hormigón, lo que sugiere una relación con el tamaño decreciente de los poros que se observa con la edad en el hormigón (Figura 4.7 [112]). Solamente observaron que las esporas supervivientes a 28 días tenían un tamaño de 0.01-0.1  $\mu\text{m}$  mientras que a la edad de 3 a 7 días todavía se encontraban tamaños de 0.1-1  $\mu\text{m}$ . Esta reducción continúa en el tiempo hasta que a los 4 meses prácticamente no se detectan bacterias viables, por lo que la capacidad de autorreparación se reduce de igual modo.

Una posible solución a la pérdida de viabilidad de las bacterias sería la encapsulación de las bacterias o la inmovilización de las esporas en una matriz protectora previo a su incorporación en la mezcla. Una posibilidad sería embeber las esporas de las bacterias en una solución de gel como una matriz inorgánica de sílice. Otra posibilidad sería crear microporos en el hormigón para que dichas bacterias puedan sobrevivir mediante la adición de sustancias aireantes [124].

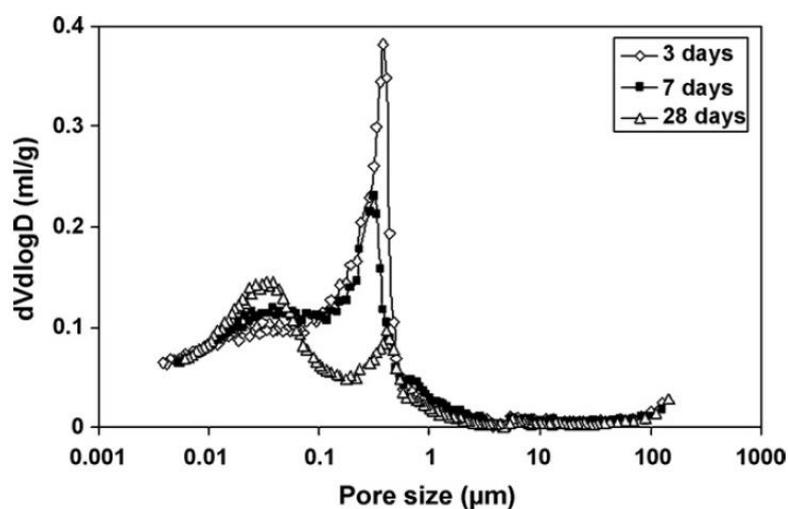


Figura 4.7 Distribución del diámetro del por con la edad del hormigón.

### 4.3 Dosificación

La dosificación de un hormigón autorreparable con bacterias no tiene por qué diferir de un hormigón convencional, es decir, se pueden utilizar proporciones análogas de los componentes habituales para un hormigón convencional. No obstante, la dosificación de las bacterias en el hormigón sí difiere considerablemente en función del autor, fundamentalmente debido al método que se emplee en cada caso. De este modo, la selección del material empleado para la protección de las bacterias o su ausencia, los nutrientes empleados o el tipo de bacteria empleados pueden variar el tipo de dosificación a realizar. Por ejemplo, mientras algunos autores (Sierra Beltrán et al. [125]) impregnan una solución de bacterias y nutrientes en árido ligero (AL), otros [126] realizan una solución de tierra diatomea, cemento y una suspensión de bacterias para añadirlo al hormigón y, por otro lado, realizan la dosificación de los nutrientes en peso por porcentaje respecto al peso de cemento. Un resumen de las diversas dosificaciones empleadas por algunos autores se muestra la .

Figura 4.8 Dosificaciones empleadas para distintos hormigones autorreparables con bacterias.

Ratios			RC (MPa)	$\Delta$ RC	Agente autorreparador		Referencia
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua	Arena			Formato	ab/c (n/c)	
1	0.397	3	50	-34%	EM+n	12.84 (12.84)	Wang et al. [122]
1	0.47	3	23-32	+32%	-	-	Achal et al. [127]
1	0.5	3	-	+40%	SB+n	2.5 (7.5)	Wang et al. [126]
1 (390)	0.5	1.46 (2.98) <sup>a</sup>	28	+16%	SB	-	Chahal et al. [128]
1 (1042) <sup>b</sup>	0.35	0.29 (0.09) <sup>c</sup>	50	+20%	SB+n	1.4	Sierra Beltrán et al. [125]
1	0.4	-	-	-	SB+n	1.4	Jonkers et al. [112]
1	0.5	3	59.9- 67.8	+2.2- 15.7%	SB	- (5%)	Erşan et al. [124]

RC: resistencia a compresión;  $\Delta$ RC: variación de la RC debido al agente reparador; ab: agente con las bacterias; EM: emulsión de microcápsulas; n: nutrientes, SB: solución de bacterias

<sup>a</sup> el valor 2.98 corresponde a árido grueso

<sup>b</sup> 405 kg/m<sup>3</sup> de cemento, 121 kg/m<sup>3</sup> de escoria de alto horno y 516 kg/m<sup>3</sup> de ceniza volante

<sup>c</sup> 0.09 se corresponde a árido ligero impregnado con bacterias y nutrientes

Wang et al. [122] emplean la microencapsulación de las esporas bacterianas de *Bacillus sphaericus* dentro de unas cápsulas basadas en melanina. Las cápsulas finales tienen un tamaño aproximado de 5  $\mu$ m y el producto final que dosifican es una emulsión de microcápsulas y agua. La dosificación se hace en porcentaje de peso seco de las microcápsulas respecto al contenido de cemento (0-5%). La concentración de las esporas en las microcápsulas es alrededor de 10<sup>9</sup> células/g de microcápsulas (peso seco). Los nutrientes incluyen extracto de levadura, urea y  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$ .

Achal et al. [127] en lugar de agua, utilizaron un medio acuoso enriquecido con *Bacillus sphaericus*. Este se preparaba añadiendo a 1 g de cemento a 50 ml de un caldo nutritivo (8g), 5 g

de NaCl, 2% de urea y 25 mM de CaCl<sub>2</sub>. De este modo, el contenido de cultivo bacteriano o relación agua cemento fue de 0.47.

Wang et al. [126] comprobaron que la tierra diatomea (TD) tenía un efecto positivo en la protección de las bacterias y producía una mayor actividad ureolítica. Para la dosificación emplearon una proporción de una suspensión de bacterias (*Bacillus sphaericus*), cultivadas con extracto de levadura y urea, y tierra diatomea. La suspensión de bacterias obtenida de una solución de NaCl (8.5 g/ml) era de 10<sup>9</sup> células/ml. Por cada 4 g de tierra diatomea se añadía 20 ml de suspensión de bacterias. Además, se añadía el nutriente compuesto por un 3.2% de extracto de levadura, 32.3% de urea y 64.5% de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4 H<sub>2</sub>O.

Chahal et al. [128] estudian el efecto de diferentes concentraciones de bacterias (0, 10<sup>3</sup>, 10<sup>5</sup>, 10<sup>7</sup> células/ml) en muestras de hormigón así como su comportamiento con porcentajes variables de ceniza volante (0%, 10%, 20%, 30%) en sustitución del cemento. La concentración de las células se realizó en un agar con urea (20 g/l), NaHCO<sub>3</sub> (2.12 g/l), NH<sub>4</sub>Cl (10 g/l), caldo nutritivo (3 g/l), y CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (25 g/l). Solamente se menciona la concentración de las células en las muestras no así la forma en que se dosifican, que probablemente sea como sustitución de una parte del agua. Advirtieron que con la sustitución por ceniza volante del cemento se reducía la resistencia a compresión a 28 días y que, el mayor incremento en la resistencia (20%), se obtenía con una concentración de bacterias de 10<sup>5</sup> células/ml y con un contenido de ceniza volante del 10%, aunque no se obtenía la máxima resistencia (27.6 MPa).

Sierra-Beltrán et al. [125] emplearon árido ligero poroso (tamaño 0.25-2 mm) como medio de protección del agente autorreparador, impregnando el árido, previo secado, con una solución de lactato de calcio (15% en peso del AL) y una concentración de 1.2×10<sup>7</sup> bacterias/g de AL. Como materiales cementicios, se emplearon cemento, ceniza volante y escoria de alto horno. A pesar de que las muestras con los agentes reparadores tenían un menor contenido de cemento que las muestras de control y que el AL con dichos agentes son menos resistentes que el resto de áridos, la resistencia a compresión a 7, 28 y 56 días eran mayores que en las muestras de control. Esto se debe a la presencia del lactato de calcio. Jonkers et al. [112] sustituyeron parte del agua necesaria para la dosificación por una suspensión de esporas, de manera que hubiera 1-10×10<sup>8</sup> esporas/cm<sup>3</sup> en la muestra de hormigón.

Erşan et al. [124] estudiaron hasta ocho métodos de protección de las bacterias: tierra diatomea, arcilla expandida, carbón activado granular, metacaolín, zeolita, aire ocluido, CERUP y ACDC. La tierra diatomea y el metacaolín con un tamaño de 5-200 µm, mientras que el resto, tenían un tamaño de partícula de 0.5-2 mm. Una suspensión concentrada de bacterias, compuesta solamente de agua y bacterias (*Diaphorobacter nitroreducens* o *Bacillus sphaericus*), se incorporaba junto con los materiales de protección mediante una técnica de saturación en vacío. El contenido de agua en la suspensión de bacterias era medido para mantener una relación agua/cemento constante de 0.5. Los nutrientes que se emplearon para *Diaphorobacter nitroreducens* fueron 2% de Ca(HCOO)<sub>2</sub> y 3% de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> en peso de cemento. Como nutrientes para *Bacillus sphaericus* emplearon 4% de urea y 1% de extracto de levadura también en peso de cemento.

#### 4.4 Características físico mecánicas

El efecto de la autorreparación autógena en la resistencia del hormigón depende principalmente de los siguientes factores [129]:

- 1) *La abertura inicial de la fisura*: las fisuras más pequeñas se reparan completamente en menor tiempo que las fisuras más grandes.
- 2) *La extensión de la fractura*: las muestras que se han roto completamente en piezas separadas no se reparan en la misma medida que lo hacen las muestras que aún conservan cierta unión tras la fractura.
- 3) *Presión aplicada en la fractura*: las fracturas sometidas a una presión se reparan de manera más efectiva en un determinado tiempo que las que no tienen ninguna carga aplicada.
- 4) *Contenido de humedad*: las muestras conservadas en agua se reparan de forma más eficaz que aquellas almacenadas en un ambiente con alta humedad relativa y, el hormigón seco no se repara.
- 5) *El tiempo*: para un determinado grado de humedad, a mayor tiempo el hormigón en contacto con dicho ambiente, más efectiva es la reparación de las fisuras.

#### Comportamiento del hormigón con bacterias

Las propiedades más importantes en el hormigón son la resistencia a compresión y la durabilidad, por lo que se necesita evaluar la influencia de las bacterias en el hormigón. Las fisuras el tamaño de los poros y su distribución tienen un efecto perjudicial en las propiedades del hormigón y consecuentemente en la durabilidad de las estructuras de hormigón. La durabilidad del hormigón se puede incrementar reduciendo la absorción, permeabilidad y difusión como principales mecanismos de transporte de los fluidos y gases en el hormigón [94].

Tabla 4.1 Efecto de las bacterias en la resistencia a compresión, permeabilidad y absorción de agua. [94]

Microorganismo	Resistencia Compresión		Durabilidad		Modo	Proceso	Referencia
	Efecto (días)		Perm.	Abs. agua			
<i>Bacillus sphaericus</i>	▼	(28)	✓	-	μC	Ureólisis	Wang et al. [122]
	▼	(90)	✓	-	μC	Ureólisis	
	✓	(3)	-	✓	-	Ureólisis	Achal et al. [127]
	✓	(7)	-	✓	-	Ureólisis	
	✓	(21)	-	✓	-	Ureólisis	
	-	-	-	✓	TD	Ureólisis	Wang et al. [126]
	✓	(7)	✓	-	-	Ureólisis	Achal et al. [121]
	✓	(28)	✓	-	-	Ureólisis	
	-	-	✓	-	μC	Ureólisis	Wang et al. [123]
-	-	✓	-	PC/PU	Ureólisis	Wang et al. [130]	
<i>Sporosarcina pasteurii</i>	✓	(7)	-	-	Siran™	Ureólisis	Bang et al. [131]
	✓	(28)	-	-	Siran™	Ureólisis	
	✓	(28)	-	✓	Directo	Ureólisis	Chahal et al. [128]
<i>Bacillus cohnii</i>	✓	(7)	-	-	AL	MSO	Sierra-Beltran et al. [125]
	✓	(28)	-	-	AL	MSO	
	▼	(56)	-	-	AL	MSO	

<i>Bacillus pseudofirmus</i>	▼	(3)	-	-	Directo	MSO	Jonkers et al. [112]
	▼	(7)	-	-	Directo	MSO	
	▼	(28)	-	-	Directo	MSO	
<i>B. sphaericus</i>	▼	(28)	-	-	CERUP	Ureólisis	Erşan et al. [124]
<i>Diaphorobacter nitroreducens</i>	✓	(28)	-	-	ACDC	Desnitrificación	
	✓	(28)	-	-	TD	Desnitrificación	
	✓	(28)	-	-	AL	Desnitrificación	

✓: efecto positivo; ▼ efecto negativo; µC: microcápsula; TD: tierra diatomea; PC: pipetas de cristal; PU: poliuretano  
AL: árido ligero ; MSO: metabolización de una sal orgánica (ej. Lactato de calcio)

Siran™: partículas de vidrio poroso sinterizado

CERUP: polvo ureolítico enriquecido cíclicamente (por sus siglas en inglés)

ACDC: Núcleo compacto desnitrificante activado (por sus siglas en inglés)

La influencia de los microorganismos reparadores en la permeabilidad y absorción de agua del hormigón se ha analizado en diversos estudios. Como se muestra en la Figura 4.9, en cuanto a la durabilidad, la permeabilidad y absorción de agua se han reducido como consecuencia de la incorporación de las bacterias. Wang et al. [130] estudiaron la influencia de la precipitación del carbonato cálcico en la permeabilidad con la incorporación de *Bacillus sphaericus*. Se observó que dicha bacteria movilizada mediante poliuretano reducía la permeabilidad hasta 6 veces en comparación con las muestras sin la bacteria. Además, se estudió la efectividad en la absorción de agua para la tierra diatomea obteniendo una reducción del 50%. Achal et al. [127] apuntaron que la aplicación de *Bacillus sphaericus* generó un hormigón impermeable. Los ensayos de permeabilidad arrojaron un coeficiente de absorción de agua 6 veces menor en las muestras con la bacteria durante un

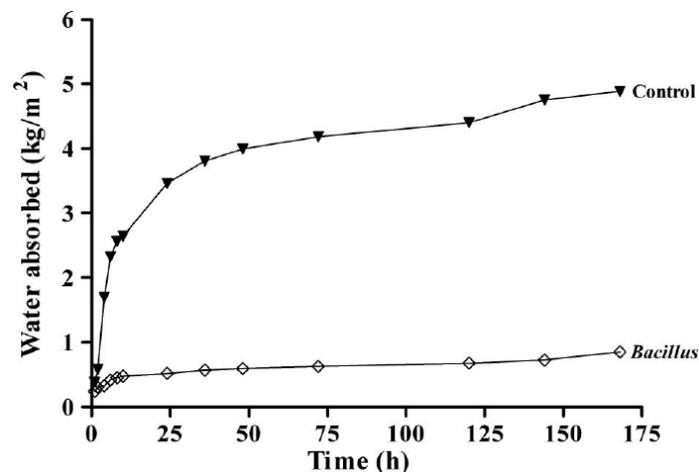


Figura 4.9 Absorción de agua en muestras con y sin bacterias (*Bacillus sphaericus*)

periodo de 168 horas (Figura 4.9). Este fenómeno se puede relacionar con la formación de nuevo carbonato cálcico formado como resultado de la acción metabólica de las bacterias. Por tanto, de acuerdo a la literatura se puede obtener un incremento importante de la durabilidad del hormigón mediante el enfoque de las bacterias debido a la reducción de los poros y relleno de las fisuras [94].

En contraposición a la durabilidad, en cuanto a la resistencia a compresión, en la literatura se pueden encontrar algunas contradicciones en cuanto a resultados. Wang et al. [122] obtuvo una disminución en la resistencia a compresión del hormigón de 15% a 34% con el empleo de *Bacillus*

*sphaericus* encapsulado en cantidad de 1% a 5%, mientras que Achal et al. [121] obtuvieron un incremento de la resistencia en probetas cúbicas reparadas con una mezcla de arena natural y bacterias.

Bang et al. [131] estudiaron el efecto de *Sporosarcina pasteurii* en la resistencia a compresión de muestras de hormigón utilizando partículas de vidrio porosas (Siran™) como árido ligero para inmovilizar las bacterias. Encontraron que la resistencia a compresión a 28 días aumentaba a medida que se aumentaba la concentración de bacterias en las partículas de vidrio poroso, obteniéndose un aumento de hasta el 24% para una concentración de  $3.1 \times 10^9$  células/cm<sup>3</sup>, a costa de perder cierta rigidez. Concluyeron que la concentración óptima para el comportamiento de la rigidez y la resistencia a compresión era de  $6.1 \times 10^8$  células/cm<sup>3</sup>.

Erşan et al. [124] presentaron el efecto de emplear bacterias ureolíticas y desnitrificantes inmovilizadas en un material protector. Evidenciaron que la aplicación de *Bacillus sphaericus* (ureólisis) en el hormigón reducía la resistencia a compresión a 7 y 28 días un 63% y 60% respectivamente. Aunque la utilización de *Diaphorobacter nitroreducens* (desnitrificante) provoca una reducción de la resistencia a compresión, mediante su inmovilización en arcilla expandida y carbón activado granular produce un incremento de hasta el 13% debido al carbón activado. Sin embargo, la inmovilización de *Bacillus sphaericus* en metakaolin y zeolita tiene un efecto negativo en la resistencia a compresión. Estos resultados aparentemente contradictorios quizá se puedan atribuir a la fragilidad del carbonato cálcico producido [94].

Como se pudo observar anteriormente en el apartado 4.2.3.2, la elección del componente orgánico adecuado como nutriente de las bacterias tiene una influencia importante en la resistencia del hormigón, así como el método empleado para incorporar las bacterias y el nutriente a la mezcla de hormigón. Debido a ello, se pueden observar en la literatura aparentes contradicciones en cuanto a la influencia del componente reparador en las propiedades mecánicas del hormigón. Sin embargo, la adición de las bacterias no presenta una reducción importante en el desarrollo de la resistencia como se puede observar en la Figura 4.10 [117], menor al 10% a edades de 3-28 días [112].

Por tanto, el desarrollo de la resistencia a compresión y demás propiedades mecánicas, dependen fuertemente del tipo de agente reparador empleado, entendiéndose como tal, la conjunción de las bacterias junto con el nutriente necesario y su modo de adición a la mezcla de hormigón.

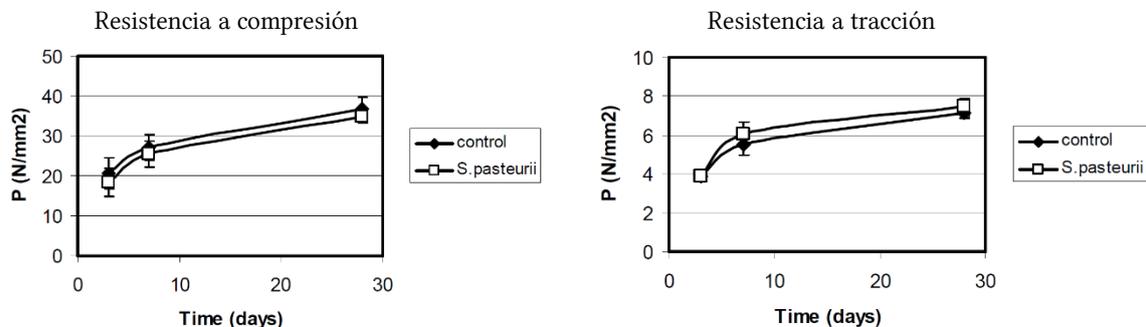


Figura 4.10 Ensayos de tracción y compresión a 3, 7 y 28 días.

En la literatura se pueden encontrar diferentes métodos para inmovilizar las bacterias y los nutrientes dentro del hormigón, como la microencapsulación [122], matrices de poliuretano [131] o productos poliméricos similares, áridos ligeros de arcilla expandida [132] etc. (Tabla 4.1). Sin embargo, hasta ahora el formato con mejor comportamiento es el desarrollado por Jonkers et al. [116], que consiste en un material pulverulento comprimido en partículas con un tamaño de 1-4 mm y que contienen las esporas el lactato de calcio. Estas, además, se protegen con una cubierta para evitar su degradación durante la puesta y el fraguado del hormigón. Una ventaja respecto a los áridos ligeros es que necesita menos cantidad de agente reparador y, por ello, se abre la posibilidad de su aplicación en hormigón de alta resistencia [116]. Los resultados mostraron que la adición de este formato de agente reparador al mortero de cemento no presentaba una influencia significativa en la evolución de la resistencia a compresión ni en la resistencia a flexión.



Figura 4.11 Agente autorreparante comercializado por *Basilisk Self Healing Concrete*.

Este producto se comercializa individualmente o en un mortero autorreparante preparado a través de la empresa *Basilisk Self Healing Concrete* que se creó en 2014 a partir de la Universidad Tecnológica de Delft para comercializar el agente autorreparante como una adición más para el hormigón convencional. Además, comercializan el producto en forma de polvo para crear una solución acuosa y aplicarlo mediante pulverizador en las grietas que se desee reparar en el hormigón.

## 4.5 Aplicaciones <sup>33</sup>

### Cuenca en el puerto de Rotterdam, Rotterdam (2017)

La aplicación más importante en cuanto a construcción con hormigón autorreparable se ha realizado en el puerto de Rotterdam con la construcción de una cuenca de hormigón (Figura 4.12 [134]). La cuenca es básicamente un tanque construido con cuatro paredes de hormigón. La cuenca tiene una longitud de 47 metros, una anchura de 5.5 metros y una altura de 5 metros. Dos de las paredes se han construido con hormigón convencional y las otras dos paredes se han construido con la adición del agente autorreparante comercializado por *Basilisk Self Healing Concrete*.

---

<sup>33</sup> Fuente: [133]

Durante la construcción no se apreciaron diferencias significativas en la trabajabilidad del hormigón autorreparable en comparación al hormigón convencional. Además, los ensayos mostraron que no había diferencia en la evolución de la resistencia comparando ambas mezclas, que solamente se diferenciaban por el contenido del agente autorreparante.



Figura 4.12 Cuenca con hormigón autorreparable en Rotterdam (Holanda).

#### Planta de aparcamiento, Apeldoorn (2016)

La primera gran aplicación del líquido autorreparante comercializado como un polvo por *Basilisk Self Healing Concrete* fue llevada a cabo en una planta intermedia de un aparcamiento en Apeldoorn (Países Bajos) por la misma empresa. Se trató una superficie de 6000 m<sup>2</sup> en dos fases. La superficie de la planta de aparcamiento tenía una protección superficial polimérica que permaneció durante el tratamiento.

El objetivo era prevenir las filtraciones de las plantas intermedias evitando así el daño en vehículos y refuerzos. La elección del tratamiento líquido en lugar de la inyección tradicional se debió a dos aspectos. El primero que, debido a que el tratamiento líquido se aplica externamente a baja presión, no se produce ningún daño en la capa polimérica de protección. El segundo era que, se podía tratar toda la planta en solo una parte del día, minimizando los inconvenientes a los usuarios del aparcamiento.

Tras el primer tratamiento se dejó un periodo aproximado de 6 semanas para la formación adecuada del carbonato cálcico. La formación de piedra caliza se hace más evidente mediante la extracción de testigos, ya que la mayoría de la reparación sucede en el interior de la grieta que no puede verse superficialmente. Tras mes y medio se puede percibir la efectividad del tratamiento al comprobar la reducción de la penetración del agua y a los seis meses, durante los periodos de lluvias, ya no se apreciaban manchas húmedas en el techo y piso subyacentes.

Para medir la efectividad del tratamiento se colocaron marcos de madera en la posición de las grietas con 10 litros de agua, midiendo la penetración del agua mediante el número de gotas que

caen por minuto a intervalos regulares. Antes del tratamiento la filtración en una grieta de 0.2-0.3 mm era de 45 gotas por minuto. Tras el tratamiento, solamente se registró una filtración de una gota por minuto.



Figura 4.13 Tratamiento en planta de aparcamiento con el agente autorreparador.

#### Groninger Forum, Groninga (2015)

El Groninger Forum se realizó mediante la excavación de muros pantalla, quedando los muros vistos tras la excavación. El aparcamiento consta de cinco plantas subterráneas de modo que la planta inferior es la que mayor presión de agua debida al terreno tiene. En varios lugares se observaba manchas húmedas y pequeñas filtraciones visibles en microfisuras. Estos síntomas se trataron mediante la aplicación del mortero autorreparante *Basilisk*.

Primero se cortó la superficie de la grieta hasta una profundidad aproximada de 50 mm para lograr suficiente superficie de adherencia. Después se aplicó un cemento de fraguado rápido en las grietas abiertas para minimizar el flujo de agua. Inmediatamente después del fraguado se aplicó el mortero autorreparante. Debido a la baja retracción del mortero se logró una buena adhesión con el hormigón circundante. Mediante la incorporación de fibras al mortero se lograba que las tensiones de tracción producidas por la presión de agua se distribuyeran de manera más uniforme tras el fraguado, resultando en una microfisuración. Gracias a la presencia de las bacterias, diez semanas después del tratamiento, las grietas existentes desaparecieron y se mostraron impermeables.

## 4.6 Conclusiones<sup>34</sup>

Es evidente que la ventaja de un hormigón autorreparable, o capaz de regenerar las pequeñas fisuras, es la durabilidad que, en definitiva, supone un coste importante en las estructuras de hormigón. Considerando que en Europa alrededor del 70% de la infraestructura está compuesta de hormigón, el mantenimiento de dicho hormigón supone un coste importante. El proyecto HEALCON financiado por el *Séptimo Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico* (7PM) estima el coste de mantenimiento anual en puentes, túneles y muros de contención para los países miembros de la UE en hasta 6 mil millones. Además, entre el 7 y el 12% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en el mundo están relacionadas con la producción del hormigón.

La anchura máxima de fisura que se puede reparar a través de las bacterias es mucho mayor que mediante la reparación autógena del hormigón. Wang et al. [122] lograron una anchura alrededor de 4 veces mayor (970  $\mu\text{m}$  por 250  $\mu\text{m}$  de la reparación autógena). Además, la permeabilidad, en todos los casos estudiados, descendió respecto a las muestras sin bacterias, hasta un valor de seis veces menor [127]. Para el caso de la resistencia a compresión, depende fundamentalmente del tipo de nutrientes empleados para las bacterias, así como el medio de protección de las mismas, de modo que habrá que estudiarse cada caso. Siendo la protección de las mismas fundamental para no perder la viabilidad de las esporas por la reducción de los poros con la edad del hormigón.

El principal obstáculo para la comercialización del hormigón autorreparable es su precio, que depende del precio de los materiales que contiene, pero que depende también del método de aplicación de los mismos. Con el método actual, el coste de producción es dos veces el coste del hormigón convencional (80 €/m<sup>3</sup>), mientras que los costes directos para reparación y mantenimiento de las grietas se ha estimado en 147 \$/m<sup>3</sup> [94]. La mayor parte del precio se debe al alimento que se debe incorporar al hormigón para alimentar a las bacterias, que es el lactato de calcio. Aunque Jonkers y su equipo están buscando otro nutriente basado en el azúcar el cual podría reducir el coste hasta niveles cercanos al hormigón convencional, entre 85 y 100 €/m<sup>3</sup>. Si se logra salvar este obstáculo, el hormigón autorreparable podría ocupar un lugar destacable en el futuro, dentro del cual se alojarían las bacterias latentes por más de 200 años protegiendo las estructuras cuando fuese necesario.

---

<sup>34</sup> Fuente: [135]

## Capítulo 5. Hormigón conductor

### 5.1 Introducción, definición y limitaciones

El hormigón es un material muy antiguo en la construcción cuyo origen suele situarse en la época del Imperio Romano, aunque recientes investigaciones arqueológicas [136] sugieren que ya en la época de las pirámides de Giza (3000-2500 a.C.) se empleó. Desde sus orígenes, se conocen las bondades a compresión de este material, así como su capacidad de ser moldeado. No obstante, también se conoce su fragilidad y baja capacidad resistente a tracción y flexión. Los romanos, como solución a esto, ya empleaban fibras naturales como crin de caballo, mejorando así, la capacidad a flexión, tracción y otras propiedades como el módulo elástico, el comportamiento a fatiga, la resistencia al impacto y la abrasión, la retracción o expansión y la formación y propagación de grietas [137].

En cuanto al refuerzo con fibras discontinuas (fibras cortas), no hubo avances significativos hasta finales del siglo XIX, a raíz de la comercialización del amianto, dando lugar al fibrocemento. Como muestra de sus bondades, solamente decir que las palabras amianto y asbestos proceden del griego incorruptible e inextinguible respectivamente [138]. Esto se debe a sus idóneas propiedades que lo hacían parecer el material perfecto. Aislamiento, propiedades mecánicas, inerte a ataques químicos, resistencia al calor y al fuego etc., además de su reducido coste. Desafortunadamente, con el tiempo se comprobó que tenía un inconveniente importante: es altamente cancerígeno, lo que conllevó la prohibición de su utilización en muchos países, incluido España.

Posteriormente, en el siglo XX, comenzaron a emplearse las fibras discontinuas de acero como refuerzo del hormigón. La ventaja fundamental de este tipo de fibras es que confiere una elevada resistencia a tracción y flexión a un coste razonable, aunque, por otro lado, presenta el inconveniente de ataque por ácidos y problemas de corrosión. Actualmente estas fibras se emplean habitualmente en gunitados, revestimientos refractarios, prefabricados etc.

En las últimas décadas se ha producido un gran desarrollo en la producción de diversos filamentos sintéticos (nylon, poliéster, Kevlar, carbono etc.) bajo el auspicio de sectores como el aeronáutico o textil. Debido a la secular necesidad de mejorar las capacidades de tracción y flexión en el hormigón, estos filamentos fueron incorporados y estudiados en el hormigón, unos con más éxito que otros.

Las fibras de carbono, son unas fibras sintéticas desarrolladas durante la década de los sesenta para la industria aeronáutica. Sus propiedades despertaron pronto el interés en el campo de la construcción, ya que recordaban a las de las fibras de amianto usadas en el fibrocemento. La Tabla 5.1 muestra algunas de las principales propiedades de las fibras empleadas en hormigones. Se puede comprobar que las excelentes propiedades mecánicas de las fibras de carbono solo son comparables con las fibras de amianto, las de vidrio, las de acero y la Kevlar (aramida). Descartando las fibras de amianto por ser peligrosas para la salud, así mismo, las fibras de vidrio convencionales tienen

graves problemas de durabilidad debido al ataque por álcalis y han de usarse fibras de vidrio modificadas, con óxido de circonio ( $ZrO_2$ ) o cubiertas de resina epoxi, que incrementan sustancialmente su coste. Las fibras de aramida y carbono son mucho más ligeras que las de acero, aunque tienen un elevado coste como desventaja. Las fibras de carbono tienen más resistencia química que las de aramida o acero, pero su alargamiento último es sensiblemente inferior.

**Tabla 5.1 Principales propiedades de las fibras utilizadas en hormigones o morteros. [137]**

Tipo de Fibra	Diámetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )	Densidad relativa	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Alargamiento último (%)
Acero	5-1000	7.80	500-3000	210	3.5
Acero Inox	5-100	7.86	2100	160	3
Acrílico	13-104	1.16 - 1.18	270-1000	14-19	7.5-50
Asbestos	0.15-3	2.6	3000	200	2-3
Carbón PAN, HM	8	1.6-1.7	2500-3000	380	0.5-0.7
Carbón PAN, HT	9	1.6-1.7	3450-4000	230	1.0-1.5
Carbón Brea, GP	10-13	1.6-1.7	480-790	27-35	2.0-2.4
Carbón Brea, HP	9-18	1.8-2.15	1500-3100	150-480	0.5-1.1
Kevlar 29	12	1.44	2900	69	4.4
Kevlar 49	10	1.44	2350	133	2.5
Nylon	23	1.14	970	5	20
Poliéster	20	1.34-1.39	230-1100	17	12-150
Polietileno	25-1000	0.92-0.96	75-590	5	3-80
Polipropileno		0.90-0.91	140-700	3.5-4.8	15
Sisal	0.2-0.4	1.2	400-800	30	3
Vidrio	9-15	1.9	2000	60	0.5
HORMIGÓN		2.3	5-8	30	0.02

PAN: poliacrilonitrilo; HM: alto módulo; HT: alta resistencia; GP: prestaciones generales; HP: altas prestaciones.

### 5.1.1 Funciones del hormigón conductor

Además de sus aplicaciones como refuerzo, en los últimos años, están surgiendo a nivel de investigación nuevas aplicaciones multifuncionales para las fibras de carbono incorporadas en hormigones. La adición de material carbonoso conductor como puede ser la fibra de carbón o el polvo de grafito lo transforma en un material conductor, estableciéndose así la posibilidad de realizar más funciones que la estrictamente estructural, es decir, en transformarse en un material multifuncional. Entre las funciones que puede desarrollar un material cementicio conductor se pueden enumerar las siguientes:

- Función de percepción de la deformación de una estructura al estar sometida a un esfuerzo, sin llevar ningún sensor adherido o embebido en él mismo.

- Función de percepción del daño estructural. La detección en tiempo real permite diferenciar entre daños estacionarios, evolutivos permanentes o reversibles. Esto es debido a que la generación o agravamiento de los defectos supone un aumento de la resistividad, lo que permitiría estudiar el daño en fenómenos como retracción, fluencia o ciclos de hielo-deshielo.
- Función de apantallamiento de interferencias electromagnéticas (EMI). Esta función se basa en el apantallamiento que una estructura conductora ejerce sobre el campo electromagnético que la atraviesa. Esto es debido principalmente a la reflexión y absorción de radiación de alta frecuencia. Para ello se debe optimizar el porcentaje de filamentos, el espesor del hormigón etc. Para una frecuencia de ondas determinada.
- Funciones dieléctricas. Sus aplicaciones incluyen el aislamiento eléctrico, los condensadores (para el almacenamiento de energía eléctrica), sustratos microelectrónicos, la piezoelectricidad y la piroelectricidad.
- Funciones de ingeniería térmica. Esta función se aplica al uso de materiales estructurales como dispositivos que permiten realizar tareas tales como: termómetros para la medición de temperatura, objetos de elevada masa térmica para la acumulación de calor, resistencias embebidas o tubería de agua caliente para calefacción etc. Dentro de esta categoría se incluye también el uso como pavimento como técnica para el deshielo.
- Función de amortiguamiento. Se aplica al desarrollo de materiales para amortiguamiento acústico y de vibraciones.
- Función de ánodo para extracción electroquímica de cloruros y protección catódica. Esta función se basa en la utilización de una pasta de cemento conductora que actúe como ánodo para la aplicación de la técnica de extracción electroquímica de cloruros y la protección catódica.

Previamente al desarrollo de las anteriores funciones, se ha comprobado que las características resistentes y la durabilidad de las diferentes matrices cementicias son adecuadas para la función estructural.

### 5.1.2 Límite de percolación

Uno de los parámetros más interesantes del fenómeno de percepción de la deformación es la máxima y mínima cantidad de material conductor necesario para observar este comportamiento. Se define el umbral de percolación como la mínima cantidad de fibras necesaria para producir un camino conductor continuo a través del material, es decir, para asegurar el contacto entre fibras sin que haya discontinuidades. El umbral de percolación se define como porcentaje en masa o volumen respecto de la cantidad de cemento en la mezcla. Cuando se sobrepasa el umbral de percolación, la resistencia eléctrica del compuesto cae en picado (Figura 5.1 [139]), y la resistividad del material llega a ser del orden de pocos  $\Omega\cdot\text{cm}$ . Para un determinado porcentaje en volumen de fibras de carbón, el umbral de percolación depende en gran medida de la longitud de las fibras empleadas y se sitúa habitualmente en alrededor del 0.5% en volumen. Cuando la longitud de la fibra aumenta, el umbral de percolación disminuye. Sin embargo, no es necesario llegar al umbral de percolación y alcanzar elevadas conductividades para observar el comportamiento piezorresistivo. De hecho, siempre será preferible la menor cantidad de fibras, ya que conlleva menores costes de fabricación y mejor trabajabilidad.

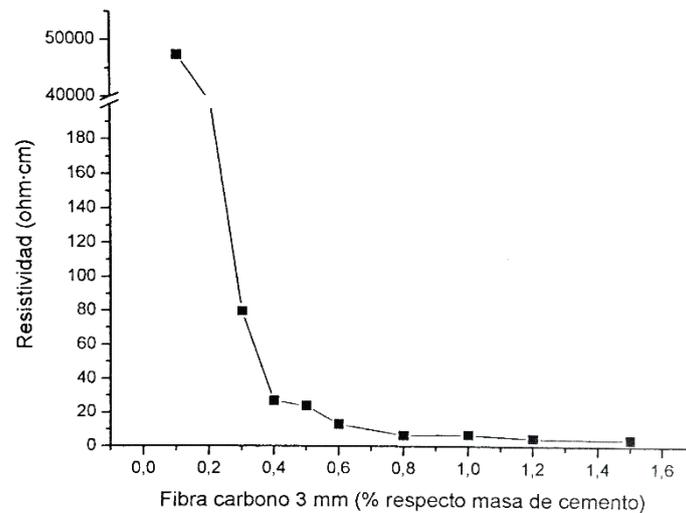


Figura 5.1 Umbral de percolación de una pasta de cemento con fibra de carbón de 3 mm.

### 5.1.3 Medida de la resistividad

En un medio poroso como el hormigón, la resistividad refleja la capacidad de transportar carga eléctrica en los iones disueltos en la fase acuosa de un determinado volumen, pudiéndose asumir a los áridos como eléctricamente inertes, ya que su resistividad resulta varios órdenes de magnitud superior a la de la solución de poros. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica en el hormigón, esta es conducida a través de la red de poros interconectada por el movimiento de los iones presentes en la solución de poros. De esta manera, es posible estudiar la difusión acelerada monitoreando la resistividad eléctrica de la probeta. En este caso, la conductividad depende de todos los iones disueltos naturalmente en la solución de poros del hormigón.

Existen diversos métodos para la medida de la resistividad en el hormigón, sin embargo, uno de los más extendidos entre la literatura es el método de las cuatro puntas o método de Wenner. El

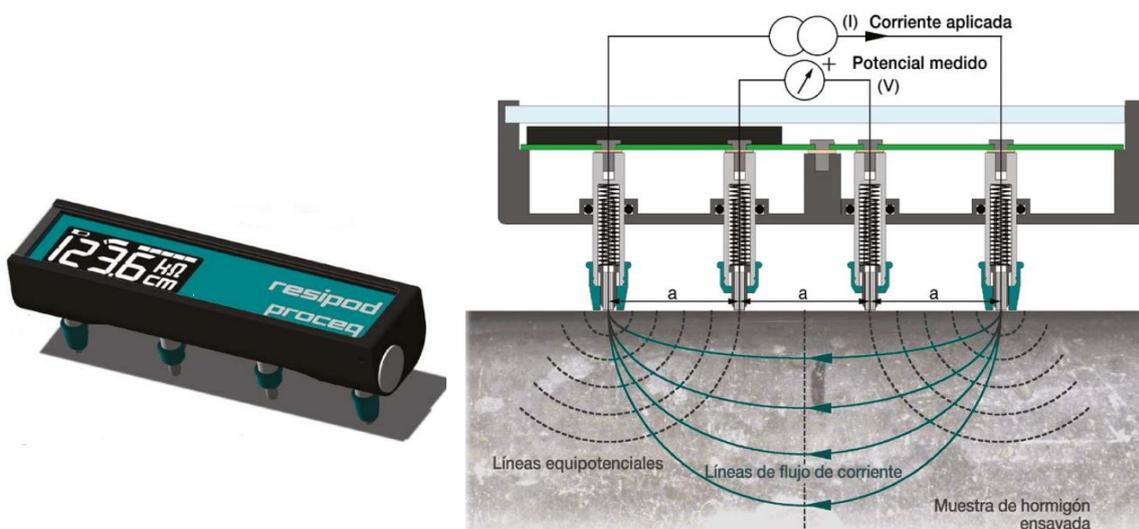


Figura 5.2 Medidor de resistividad tipo Wenner.

método consiste en colocar cuatro electrodos equidistantes y alineados en una probeta de hormigón. Se hace pasar una corriente alterna (AC) a través de los dos electrodos de los extremos, y se mide el voltaje existente entre los otros dos electrodos interiores.

Para la medición se utilizará un medidor de resistencia eléctrica (resistivímetro) de cuatro puntas o tipo Wenner (Figura 5.2 [140]). Éste inducirá a la probeta una corriente alterna de hasta 40mA con una frecuencia inferior a 500Hz [141]. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas según la ecuación [140]:

$$\rho = 2 \pi a \frac{V}{I} \quad (\text{k}\Omega \cdot \text{cm}) \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

a: distancia entre electrodos (5 cm)

V: voltaje medido (V)

I: corriente medida (A)

## 5.2 Tipos de adiciones conductoras

### 5.2.1 Fibras de carbono (FC)

La fibra de carbono es un material formado por fibras de 10-50  $\mu\text{m}$  de diámetro, compuesto principalmente de átomos de carbono. Los átomos de carbono están unidos entre sí en cristales microscópicos (anillos hexagonales aromáticos), que están más o menos alineados en paralelo al eje longitudinal de la fibra. La alineación de cristal da a la fibra la alta resistencia para su reducido tamaño. Varios miles de fibras de carbono están trenzados para formar un hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o tejido en una tela [142].

Cada hilo de filamento de carbono es un conjunto de muchos miles de filamentos de carbono, pudiendo tener hilos con más de 40.000 filamentos de carbono. Uno de estos filamentos es un tubo delgado con un diámetro de 5.8  $\mu\text{m}$  (Figura 5.3) y se compone casi exclusivamente de carbono (>90%). La primera generación de fibras de carbono tenía un diámetro de 7.8  $\mu\text{m}$ . Más tarde, se alcanzaron fibras con diámetros que son aproximadamente de 5  $\mu\text{m}$  [142].

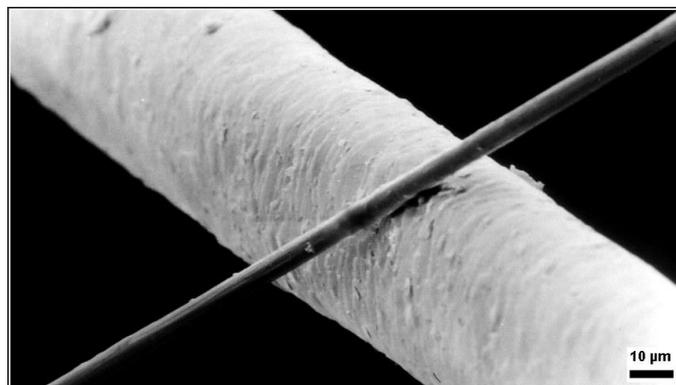


Figura 5.3 Filamento de carbono de 6  $\mu\text{m}$  (delante) y cabello humano (50-80  $\mu\text{m}$ ).

La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito, que consiste en láminas de átomos de carbono (láminas de grafeno) dispuestos siguiendo un patrón hexagonal regular. La diferencia radica en la forma en que se vinculan las láminas. El grafito es un material cristalino en el cual las láminas se apilan paralelas entre sí de manera regular. Las fuerzas intermoleculares entre las láminas son relativamente débiles (fuerzas de Van der Waals), dando al grafito sus características blandas y quebradizas [142].

Actualmente existen dos tipos de fibras dependiendo del precursor para hacer la fibra. La fibra de carbono puede ser turbostrática o grafitica, o tienen una estructura híbrida con las partes presentes tanto en grafiticas y turbostráticas. En fibra de carbono turbostráticas las láminas de átomos de carbono se apilan al azar o en forma irregular. Las fibras de carbono derivadas del poliacrilonitrilo (PAN) son turbostráticas, mientras que las fibras de carbono derivadas de la brea de mesofase son grafiticas después del tratamiento térmico a temperaturas superiores a 2.200 °C. Las fibras de carbono turbostráticas tienden a tener alta resistencia a la tracción, mientras que un tratamiento térmico en la brea de mesofase derivada en fibras de carbono con un alto módulo de Young (es decir, baja elasticidad) y alta conductividad térmica [133].

El material más utilizado para la obtención de fibras de carbono es la fibra de poliacrilonitrilo (PAN). Las fases para la obtención de una fibra de carbono procedentes de PAN son las siguientes [143]:

1. *Estabilización y oxidación:* las fibras son estiradas para alinear sus redes internamente. Luego se produce un calentamiento en atmósfera oxidante desde temperaturas de 200 °C hasta 250 °C manteniendo la tensión sobre las fibras.
2. *Carbonización:* calentamiento en atmósfera inerte a temperaturas de hasta 1500 °C. Se elimina principalmente el H y el N de las fibras originales transformándose en fibras de carbono.
3. *Grafitización:* calentamiento en una atmósfera no oxidante hasta temperaturas de 2500 °C - 3000 °C para obtener un módulo de elasticidad mayor, a expensas de una alta resistencia a la tracción.

Los productos primarios resultantes del proceso anterior son fibras continuas con un contenido de carbono de entre 95% y 100% de carbono, según se requieran unas propiedades u otras. Todos los demás productos, por ejemplo, las fibras de filamentos discontinuos, se obtienen de operaciones secundarias. Según sea la temperatura de tratamiento, se distinguen diferentes tipos de fibra de carbono [143]:

- Fibras de carbono de alto módulo (HM o tipo I), derivadas de la demanda de alta rigidez de piezas aeroespaciales y aeronáuticas, estas fibras de carbono presentan un alto módulo de elasticidad, coste elevado y bajo alargamiento a la rotura.
- Fibras de carbono de alta resistencia (HT o tipo II), su resistencia es alta y su tenacidad es superior a la del tipo I, su coste es moderado y tiene un amplio campo de aplicación.
- Fibras de carbono intermedio (IM o tipo III): son las menos rígidas de las tres y las menos costosas. Este tipo de fibras tienen la menor temperatura de tratamiento.

Las fibras de carbono obtenidas a partir de brea son más económicas que las de PAN al ser el precursor más asequible. Se comercializan dos grados diferentes: las de uso general (GP), que son producidas a partir de brea isotrópica y las de altas prestaciones (HP), producidas a partir de brea

de mesofase. Evidentemente las HP tienen una resistencia a tracción y un módulo elástico superior a las GP [137].

Una vez el proceso de obtención de las fibras de carbono ha terminado se prosigue a modificar las superficies de las mismas por medio de un proceso de oxidación con el propósito de incrementar los grupos reactivos y mejorar así las fuerzas de interacción de la interfase entre las fibras y la matriz.

Las fibras de carbono discontinuas (chopped) se suelen comercializar en trenzas de unos 12000 filamentos. Dichas trenzas deben ser desechas y los filamentos individualizados lo máximo posible antes de ser incorporados a la mezcla. Su posterior amasado con el hormigón suele ser pobre y, normalmente consiste en un camión hormigonera convencional. Por este motivo, es aconsejable el uso de aditivos que faciliten esta dispersión [137].

Tabla 5.2 Propiedades de distintos tipos de fibras de PAN como precursor. [143]

Designación	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Diámetro del hilo ( $\mu\text{m}$ )	7	8	7-8
Densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1810-1870	1740-1760	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	390	230	290
Resistencia a tracción (GPa)	2.1-2.7	2.6-2.5	3.1
Elongación a la rotura (%)	0.7	2	1.1
Coef. exp. térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	2.56	2.56	2.56

### 5.2.2 Nanofibras de carbono (CNF)<sup>35</sup>

Las nanofibras de carbono (CNF por sus siglas en inglés) o fibras de carbono de crecimiento en fase vapor (VGCFs) son nanofilamentos generados catalíticamente, de dimensiones semejantes a los nanotubos de carbono (CNT), pero con una disposición diferente de los planos de grafeno, siendo por tanto el hidrógeno necesario para la estabilización de estas estructuras. Son producidas por la descomposición de hidrocarburos como el benceno y el metano con la presencia de hidrógeno.

La separación existente entre los CNT y CNF consiste básicamente, en el diferente origen y diferente aplicación y escala de quienes los desarrollaron, más que en su estructura propiamente dicha. Los CNT fueron descubiertos y desarrollados por grupos de investigación que trabajaban sintetizando fullerenos, vaporizando grafito en la escala de microgramos. Por otro lado, las CNF fueron desarrolladas en el ámbito de producir unas fibras de carbono alternativas, más económicas a las obtenidas por hilado, a partir de precursores carbonosos en forma de vapor, denominadas fibras de carbono crecidas en fase de vapor (VGCF), siendo el fin su uso en materiales compuestos.

Las nanofibras de carbono tienen diámetros que comprenden entre 70 y 200 nm, debido a una pared más gruesa (ver Figura 5.4). A diferencia de los nanotubos, que se conforman en capas de

<sup>35</sup> Fuente: [143]

grafito enrollados en cilindros, las nanofibras están dispuestas en forma de conos apilados. Sin embargo, no existe una definición clara de lo que son las nanofibras de carbono (CNF), por lo que la terminología empleada es confusa aún dentro de la propia comunidad científica. La tendencia es a considerar las nanofibras de carbono unos materiales intermedios entre las fibras micrométricas de carbono (producidas por hilado) y los nanotubos de carbono.

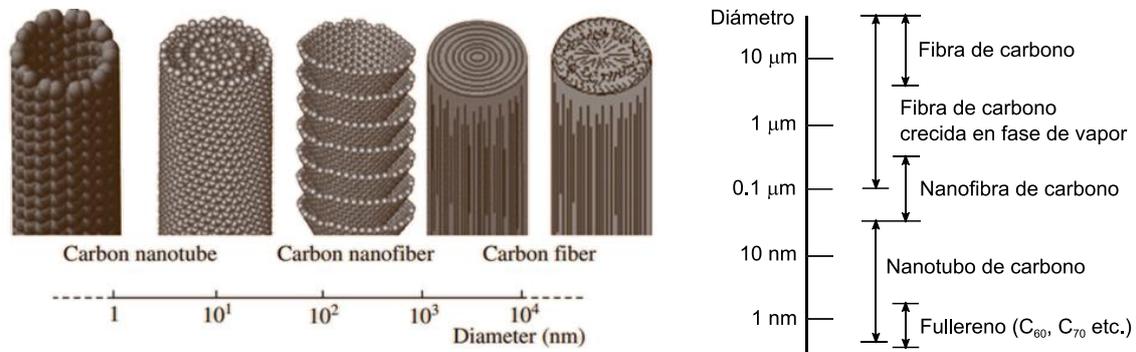


Figura 5.4 Visión general de los diámetros correspondientes a distintos productos de carbono.

Aunque la calidad de las nanofibras en comparación con los nanotubos respecto a capacidades mecánicas, térmicas y eléctricas son posiblemente inferiores, una ventaja es su bajo coste de producción, pudiéndose beneficiar de la producción a escala industrial.

Hasta el momento se han descubierto un total de cuatro tipos diferentes de nanofibras de carbono, que se clasifican de acuerdo a la orientación de los planos de grafito en dirección al eje:

1. **Plaquetas:** Los planos grafíticos son perpendiculares al eje, por lo que la conducción eléctrica no está favorecida en la dirección del eje del nanofilamento. Pueden ser tanto rectos con respecto al eje, como helicoidales, denominándose en ocasiones nanocoils a estos últimos. El metal suele estar en medio de la fibra, para un crecimiento bidireccional.
2. **Espina de pez:** Los planos grafíticos están inclinados respecto al eje, siendo su sección poligonal por la geometría de la partícula catalítica. Pueden ser macizos o huecos. En el primer caso, la partícula suele estar en el centro (bidireccional), mientras que en el segundo suele estar en la punta.

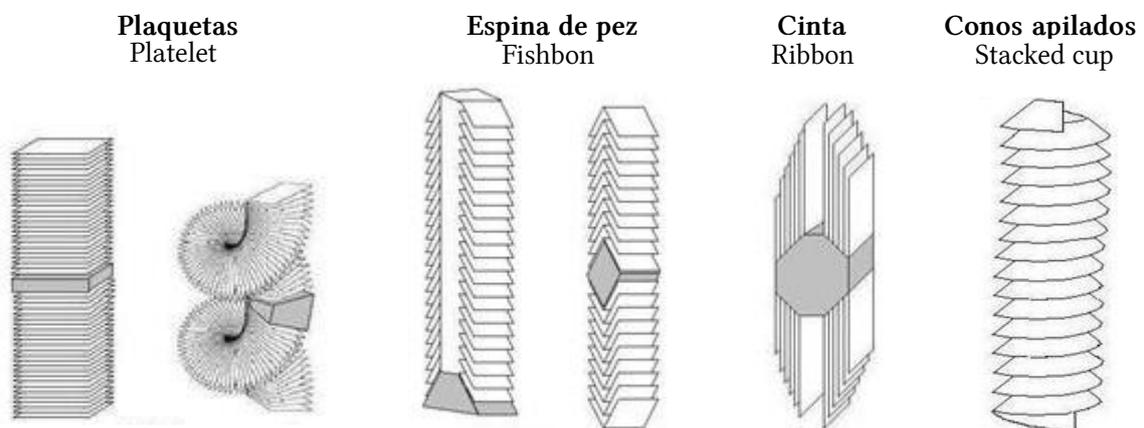


Figura 5.5 Diferentes estructuras de las nanofibras.

3. Cinta: Es un tipo de estructura de planos grafiticos paralelos al eje, que puede confundirse fácilmente con los nanotubos de pared múltiple. Por ello, no se conoce con exactitud cuándo se obtienen, especialmente si la fuente de carbón es etileno o metano.
4. Conos apilados: Semejante a la estructura espina de vez, excepto que son siempre huecas, el canal es siempre muy ancho y la sección de la nanofibra es circular. Existe una discrepancia sobre si la estructura es de conos apilados o si es un enrollamiento continuo en espiral.

### 5.2.3 Nanotubos de carbono (CNT)

El descubrimiento de los nanotubos de carbono (CNT por sus siglas en inglés) se atribuye a Sumio Iijima en 1991 (Japón), cuando empleaba un sistema de evaporación de arco eléctrico, típico para la obtención de fullerenos, y observó la formación de agujas de hasta 1 mm de longitud sobre el cátodo de grafito [144]. Los fullerenos, fulerenos o buckminsterfullerenos, entre otras denominaciones (descubiertos en 1985 y Premio Nobel de Química 1996), son la tercera forma estable del carbono conocida, y la primera estructura descubierta ( $C_{60}$ ) es la de una cúpula geodésica o esfera compuesta de 20 hexágonos y 12 pentágonos donde ningún pentágono comparte un vértice (Figura 5.6, b [145]). De su forma deriva su nombre en referencia a Richard Buckminster Fuller, conocido por el diseño de cúpulas geodésicas.

Los nanotubos de pared sencilla tienen típicamente un diámetro de 1 a 2 nm (Figura 5.6, b [145]) y, generalmente las preparaciones de nanotubos son heterogéneas, con una mezcla de tubos de diferente diámetro y longitud que tienden a empaquetarse en haces. Además, son frecuentes los defectos estructurales tanto en las paredes como en los extremos.

Los primeros nanotubos conseguidos constaban de hasta 20 capas de cilindros concéntricos, con diámetros entre 3 y 30 nm y cerrados en sus extremos por hemifullerenos. La proximidad entre las

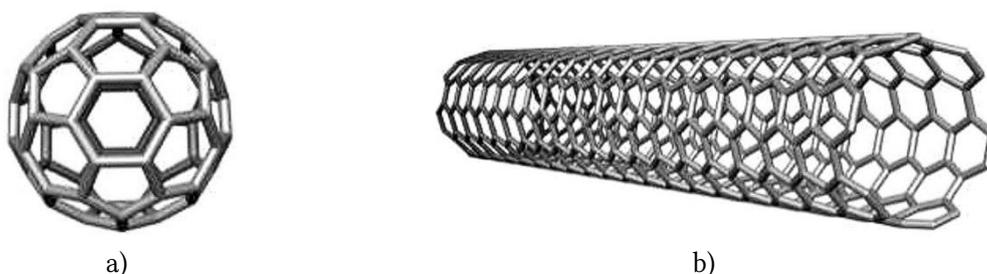


Figura 5.6 Estructura química del (a) fullereno  $C_{60}$  y (b) un nanotubo de pared sencilla.

capas es similar a la presente entre las capas planas del grafito.

Son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica y, por tanto, interesantes para el reforzamiento estructural de materiales y formación de composites de bajo peso, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad. La resistencia a la tensión de los nanotubos (CNT por sus siglas en inglés) es hasta 20 veces superior a la de los mejores aceros, con un sexto de su densidad y la mitad de densidad que el aluminio [144]. La rigidez de los nanotubos es igualmente elevada, hasta 5 veces superior al acero y una capacidad de deformación elástica de 12%, es decir, 60 veces mayor al acero. También son conductores eléctricos y térmicos, tan eficientes al menos como el cobre y el diamante, respectivamente. Estas propiedades se ven, no obstante, moduladas

por el diámetro, longitud y quiralidad (parámetros geométricos) de los nanotubos. Concretamente, dependiendo del tipo de cierre de la lámina pueden comportarse como conductores, semiconductores o incluso aislantes, o bien superconductores [144].

Las ventajas que se suponen al uso de nanofilamentos como refuerzo en lugar de los microfilamentos son las siguientes:

- Las propiedades mecánicas de los filamentos individuales son mucho más elevadas. Medidas directas realizadas a los nanotubos mediante un módulo de carga instalado en un microscopio electrónico de barrido dieron entre 11 y 63 GPa a tensión máxima de rotura y un módulo de entre 270 y 950 GPa, es decir, entre 3 y 20 veces más resistencia a tracción que las fibras de carbono de PAN y hasta el doble de módulo (Tabla 5.3).
- Tienen relaciones de aspecto (longitud/diámetro) mucho más elevadas, que hacen que se comporten mejor evitando la propagación de grietas.
- Tienen un diámetro muy inferior a las fibras de carbono, lo que hace que, teóricamente, puedan estar más espaciados y dispersos en la matriz, además de tener mayor superficie de contacto con ésta.

**Tabla 5.3 Comparativa en microfilamentos y nanofilamentos de carbono.**

Tipo de Fibra	Densidad relativa	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Carbón PAN, HM	1.6-1.7	2500-3000	380
Carbón PAN, HT	1.6-1.7	3450-4000	230
Carbón Brea, GP	1.6-1.7	480-790	27-35
Carbón Brea, HP	1.8-2.15	1500-3100	150-480
Nanotubo	1.35	11000-63000	270-950

Existen dos tipos de nanotubos de carbono: de pared sencilla (SWCNT) o de pared múltiple (MWCNT). Los de pared sencilla están formados únicamente por un tubo, mientras que los de pared múltiple, están formados por tubos concéntricos unos dentro de otros. Los primeros en descubrirse fueron estos últimos y, debido a la serendipia, se descubrieron posteriormente los nanotubos de pared sencilla [145]. Actualmente los nanotubos de pared múltiple tienen mayor aplicación por ser más fáciles de producir que los de pared sencilla, aunque éstos últimos tengan mejores propiedades. Los nanotubos de pared múltiple pueden tener entre 5 y 15 capas con un diámetro de entre 8 y 12 nm (Figura 5.8 [146]).

### Riesgos de los nanotubos en la salud<sup>36</sup>

Los materiales de reciente descubrimiento, como es el caso de los nanotubos de carbono, en muchas ocasiones se empieza a comercializarlos sin evaluar adecuadamente los riesgos que éste puede tener en la salud, medio ambiente etc. Este es el caso de los nanotubos y, cabe mencionar que diversas investigaciones en animales han comprobado que ciertos tipos de nanotubos de pared múltiple son carcinógenos para las células mesoteliales de la misma forma que las fibras de asbesto.

<sup>36</sup> Fuente: [147]

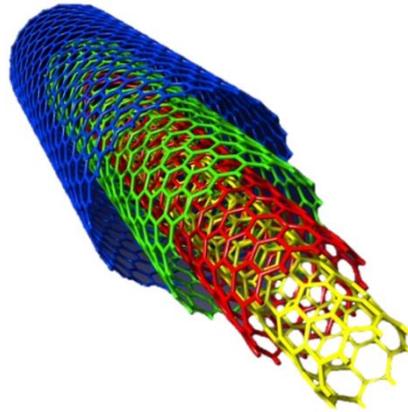


Figura 5.8 Estructura química de un nanotubo de pared múltiple.

Sin embargo, dicho efecto está modulado por diversos factores como el diámetro, longitud, rigidez y modificación de la superficie de los nanotubos de pared múltiple. Es decir, el tamaño nanométrico, la forma similar a una aguja y su gran durabilidad, parecen ser factores que producen estos efectos similares al asbesto. Los nanotubos de pared simple han producido alteraciones en la mitosis de células cultivadas, pero de ningún modo, se ha demostrado que sean carcinógenas.

En cualquier caso, los nanotubos de carbono deben ser tratados con mayor precaución especialmente cuando se emplean para usos industriales y comerciales. Por el momento, una carga en el aire de  $0.03 \text{ mg/m}^3$  se considera adecuado en todas las áreas donde se emplean nanotubos.

### 5.3 Dosificación

La dosificación de los nanofilamentos presenta principalmente dos aspectos críticos, los mismos que cualquier otro compuesto polimérico con estos nanofilamentos, que son las siguientes:

- La dispersión de los nanomateriales en la matriz cementicia que tienden a aglomerarse de forma importante en la matriz cementicia debido a las fuerzas de van der Waals, provocando así mismo una reducción de la fluidez de la pasta [148], [149]. Además, las aglomeraciones de nanotubos en la pasta actúan como pequeños concentradores de tensión.
- La unión de estos nanomateriales en la misma matriz. Cuanto mejor sea la unión entre los filamentos y la matriz mejor será la adherencia y transmisión de cargas de la matriz a los filamentos, redundando en una mejora de las propiedades físico-mecánicas.



Figura 5.11 Vista a diferentes escalas de nanotubos de pared múltiple suministrados.

Galao [148] estudió pastas de cemento con adición de nanofibras de carbono de tipo stacked-cup con un diámetro de 20-80 nm y longitud superior a 30  $\mu\text{m}$ . El porcentaje fue variable (0-5%), siendo la mezcla con 5% de nanofibras para aplicarse en forma proyectada para calefacción de estancias o deshielo de infraestructuras, con un contenido agua/cemento igual a 1. Previo al amasado con el cemento, las nanofibras se vertieron junto con el agua en una mezcladora y se sonicó para mediante cavitación de las microburbujas separar las nanofibras. Las pastas con 1% y 2% de nanofibras no ofrecieron resultados adecuados para su aplicación como elementos calefactores debido a que éstas para sufrir grandes cambios de temperatura necesitan ser aplicados diferencias de potencial muy altos ( $\sim 150\text{ V}$ ). Sin embargo, la mezcla proyectada con un 5% de nanofibras presentó un menor consumo energético y significativos incrementos de temperatura con potenciales superiores a 65 V. Esta misma mezcla se empleó para la fabricación de sensores para percepción de la deformación en probetas de hormigón.

Li et al. [150] emplearon tanto fibras de carbono como nanotubos de carbono. Las fibras tenían un diámetro de 10-14  $\mu\text{m}$  y longitud de 6 mm. Los nanotubos de carbono, tenían un diámetro de 10-30 nm y una longitud de 0.5-500  $\mu\text{m}$ . Estos últimos fueron tratados con una solución de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) en proporción 3:1 para mejorar la resistencia de la unión entre los nanotubos y la matriz cementicia y, garantizar una mejor transferencia de la carga a través de los huecos y fisuras en la matriz.

Fu y Chung [151] emplearon una mezcla de nanofibras de carbono con un 15% (en peso respecto cantidad de cemento) de humo de sílice y un 0.4% (en peso respecto cantidad de cemento) de metilcelulosa, con el fin de ayudar a la dispersión de los filamentos. Las nanofibras empleadas, tenían un diámetro de 0.1  $\mu\text{m}$  y longitud superior a 100  $\mu\text{m}$ , fueron sometidas a un tratamiento de ozono gas para mejorar la interfase entre los filamentos y la matriz. El tratamiento mejoró ligeramente las propiedades mecánicas (incremento de la resistencia a compresión un 3% y resistencia a tracción un 10%) y disminuyó la resistividad (un 44%).

Collins et al. [149] probaron diferentes sustancias tensoactivas o dispersantes para probar su eficacia en la dispersión de los nanotubos. Las sustancias estudiadas fueron: aireantes, caucho estireno butadieno, policarboxilato, naftalen sulfonato de calcio y lignosulfonatos. Tanto el caucho estireno butadieno como el naftalen sulfonato de calcio favorecieron la aglomeración de los nanotubos, de modo que no se consideraron. Los aireantes y lignosulfonatos mostraron buena dispersión en el agua, aunque cuando se añadía a la pasta de cemento se producía una reducción de resistencia y consistencia debido a que los nanotubos compiten con el cemento en la reacción con la adición. En cambio, con el carboxilato se lograron consistencias bastante fluidas incluso con relaciones agua/cemento de 0.35 y, además, un incremento de la resistencia a compresión de 25% respecto a las muestras sin nanotubos, lo cual denota que se ha logrado una buena dispersión.

Sassani et al. [152] estudiaron la influencia del contenido de fibras de carbono, su longitud, la proporción de áridos finos y gruesos, la dosificación del agente de dispersión (metilcelulosa) y la dosificación un agente que mejora la conductividad. Las fibras tenían 6 y 12 mm y se incorporaron a la dosificación sustituyendo el volumen de árido fino en cantidades de 0.1%, 0.55% y 1.0%. La dosificación con 0.1% de fibras en la Tabla 5.4 contiene además 15  $\text{kg/m}^3$  de agente impulsor de la conductividad.

Tabla 5.4 Dosificaciones de hormigones conductores multifuncionales.

Referencia	Dosificación (c:a:s:g) <sup>a</sup>	FC <sup>b</sup> (%)	Tipo de fibras	Función	RC (MPa) <sup>c</sup>	Resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ )
Fu y Chung [151]	-	0.5	CNF	EMI	48.6 (-16%)	134
Li et al. [150]	1:0.45:1.5	0.5	CNF	-	47.5 (-10%)	-
	1:0.45:1.5	0.5	CNT	-	62.1 (+19%)	-
Galao [148]	1:1	5	CNF	Sensor def.	-	10
Collins et al. [149]	1:0.35	0.5	CNT (PC)	-	52.8 (+25%)	-
	1:0.5	0.5	CNT (AEA)	-	20.4 (-12%)	-
	1:0.5	0.5	CNT (WRDA)	-	17.3 (-25%)	-
Sassani et al. [152]	1:0.42:2.37: 1.82	0.1 <sup>d</sup>	FC	-	66	33
	1:0.42:1.8: 2.37	1 <sup>d</sup>	FC	-	20	8

<sup>a</sup> cemento: agua: arena: árido grueso; <sup>b</sup> fibra de carbono genérica en peso respecto del cemento; <sup>c</sup> entre paréntesis se muestra la variación en % de la resistencia a compresión respecto a la muestra sin fibras; <sup>d</sup> en volumen

PC: policarboxilato

AEA: agente aireante

WRDA: lignosulfonato

### 5.3.1 Métodos de dispersión de filamentos de carbono

Al igual que los áridos en el hormigón convencional se procura que tengan una distribución homogénea mediante una correcta mezcla y amasado, la dosificación de los nanofilamentos en la mezcla cementicia requiere también que éstos se distribuyan uniformemente con el fin de lograr las mejores características en el material compuesto final y no verse perjudicadas. Anteriormente se comentó la dificultad que implica la correcta distribución de los nanofilamentos debido a las fuerzas de van der Waals, para evitar que por este motivo se produzcan aglomeraciones de nanofilamentos en la mezcla se ha recurrido a diversas técnicas que a continuación se detallan.

- *Mezclado de alta velocidad en masa fundida:* fue el método más extendido en la preparación de composites durante la pasada década debido a su bajo coste, simplicidad y disponibilidad. Consiste en dispersar los nanofilamentos en la matriz mediante tornillos que giran a gran velocidad y con mucha energía. Esto garantiza una buena dispersión a costa de dañar el nanomaterial, lo cual, afecta a las propiedades del material compuesto final.
- *Sonicación:* consiste en dispersar las nanopartículas o nanofilamentos en una solución líquida y someterla a ultrasonidos antes de ser incorporados a la matriz. Además, se requiere refrigeración en el proceso para evitar el calentamiento durante el mismo.
- *Tratamiento superficial:* es un tratamiento que consiste en insertar diversos grupos funcionales en la superficie de los nanomateriales de carbono, procurando que la compatibilidad entre dichos grupos y la matriz sea favorable. Generalmente se realiza mediante la oxidación de la superficie de los nanomateriales de carbono sumergiéndolos en ácidos (sulfúrico, nítrico) a diversas temperaturas. Así, las partes reactivas de los nanotubos, los extremos y los defectos, se oxidan fácilmente permitiendo introducirse a grupos carboxilo cargados negativamente, obteniéndose una buena dispersión debido a las fuerzas electroestáticas de repulsión.

- *Tratamiento superficial no covalente:* consiste en tratar la superficie de los nanotubos con un surfactante o tensoactivo polarizado en lugar de emplear ácidos. A diferencia del tratamiento con ácido en el que se inserta un grupo funcional en la superficie de los nanotubos, los tensoactivos envuelven las superficies de los nanotubos y logra la dispersión de estos en la solución. Tras lo cual, se mezclan con el cemento para formar el compuesto.

## 5.4 Propiedades físico mecánicas

### 5.4.1 Resistencia a compresión y resistividad

La resistencia a compresión de pastas de cemento con fibras de carbono se ha comprobado en diversos estudios que disminuye la resistencia a compresión de las probetas (Li et al. [150], Fu y Chung [151]) y aumenta la porosidad (31% [150]) aunque aumenta la resistencia a tracción (hasta un 40% [151]) y flexión [150]. En cualquier caso, el tratamiento de la superficie de las fibras empleadas aumenta sensiblemente todas las propiedades mecánicas y disminuye la resistividad del compuesto cementicio, salvo que el contenido de fibras se encuentre próximo al umbral de percolación, en cuyo caso se puede provocar el efecto contrario según Sassani et al. [152]. Evidentemente, a mayor cantidad de filamentos empleados menor es la resistividad (Figura 5.12 [148]).

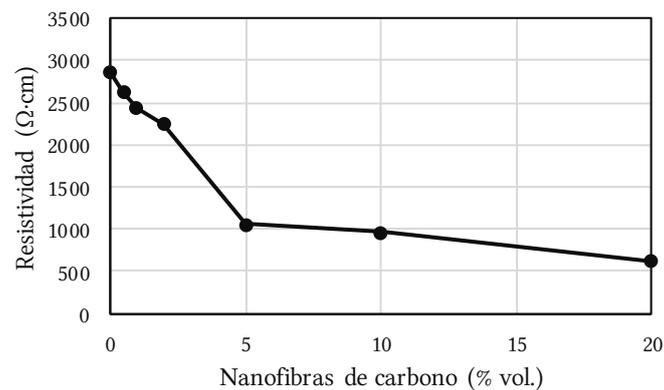


Figura 5.12 Resistividad de un mortero en función del contenido de nanofibras de carbono.

Por otro lado, la adición de nanotubos de carbono ha demostrado mejorar considerablemente todas las propiedades mecánicas, aunque solamente se puede lograr con la adecuada dispersión de los nanotubos. En caso contrario, las propiedades mecánicas y la consistencia pueden empeorar considerablemente [149]. Li et al. emplearon nanotubos tratados con ácido sulfúrico y ácido nítrico, lo que provocó la presencia de grupos de ácido carboxílico en la superficie de nanotubos. Las propiedades mecánicas mejoraron, según los autores, debido a las siguientes razones:

- La reacción que tiene lugar entre los grupos de ácido carboxílico con los silicatos de calcio hidratado (C-S-H) o portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), lo cual, crea una fuerza covalente fuerte en la interfase entre el nanotubo y la matriz, aumentando la eficiencia de la transferencia de carga de la matriz a los nanotubos.

- Debido a la reducción de la porosidad de la matriz cementicia. Es sabido que la porosidad está directamente relacionada con la resistencia del hormigón, en este sentido, la adición de nanotubos reduce la porosidad (un 64 %) y el tamaño de los poros existentes (Figura 5.13 [150]).
- Efecto de conexión puente de los nanotubos. Estos actúan como puentes entre las fisuras y huecos, garantizando la transferencia de la carga en tracción, mejorando también la resistencia a flexión (Figura 5.14 [150]).

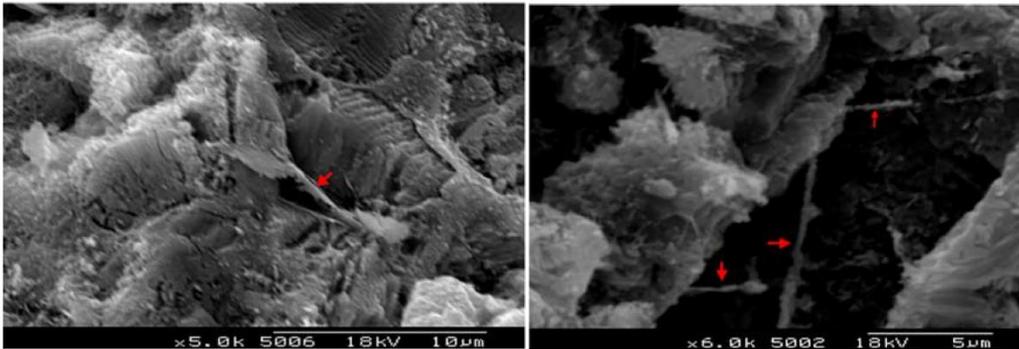


Figura 5.14 Imagen de SEM de nanotubos de carbono en la pasta de cemento (Flechas: nanotubos de carbono).

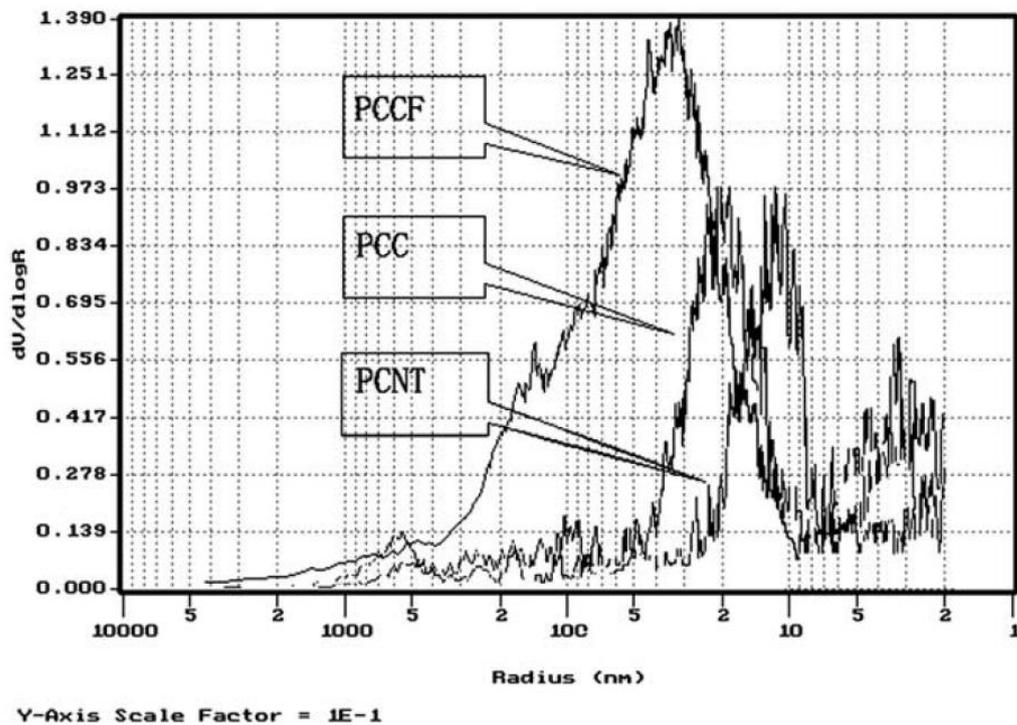


Figura 5.13 Distribución de la porosidad en mortero convencional (PCC), mortero con 0.5 % de nanofibras (PCCF) y mortero con 0.5 % de nanotubos (PCNT).

Sassani et al. [152], en la misma línea que los anteriores autores, apuntó que la resistencia a compresión se ve fuertemente influida por el contenido de fibras y las dosificaciones tanto del agente impulsor de la conductividad, como del agente de dispersión de las fibras. Así mismo, determinaron que las fibras de 12 mm tienen un ligero efecto positivo en la resistividad y despreciable

en el caso de la resistencia respecto a las fibras de 6 mm, sin embargo, recomiendan el uso de éstas últimas por motivos de amasado y puesta en obra. Así mismo, observaron que la resistividad del hormigón era muy sensible al aumento de la relación árido grueso/fino y que con relaciones de 0.7 y 0.95 se lograba mejor trabajabilidad y consistencia que con una relación mayor como 1.2.

A continuación, se presenta la en la que se resumen algunos estudios llevados a cabo con hormigones conductores con adiciones de carbono de diferentes tipos. Se puede observar que de todos esos estudios solamente consiguen mejorar la resistencia a compresión las adiciones consistentes en nanotubos de carbono (de pared múltiple en este caso) y con un agente de dispersión. En el resto de los casos, el empleo de adiciones como fibra de carbono o nanofibras de carbono han empeorado la resistencia a compresión. Sin embargo, el empleo de agentes de dispersión y/o tratamientos superficiales de los filamentos han tenido efectos positivos en la resistencia a compresión, aunque bastante limitados en el caso de las fibras y nanofibras de carbono a tenor de los resultados.

**Tabla 5.5 Resistencias a compresión obtenidas en diversos estudios.**

Referencia	Características de las fibras				Tratamiento superficial	Agente de dispersión	RC (MPa)	$\Delta$ RC (%)
	% <sup>a</sup>	d/l ( $\mu$ m) <sup>b</sup>	R. aspecto	Tipo				
Fu y Chung [151]	0.5	0.1/>100	>1000	CNF	×	×	40.9	-29.4
	0.5	0.1/>100	>1000	CNF	✓	×	42.5	-26.6
	0.5	0.1/>100	>1000	CNF	×	✓	41.6	-28.2
	0.5	0.1/>100	>1000	CNF	✓	✓	43.5	-24.9
	0.5	0.1/>100	>1000	CNF	×	✓	47.2	-18.5
	0.5	0.1/>100	>1000	CNF	✓	✓	48.6	-16.1
Li et al. [150]	0.5	~12/6000	~500	CNF	✓	✓	47.5	-10
	0.5	~0.015/250	<1000	CNT	✓	✓	62.1	+19
Collins et al. [149]	0.5	0.015/10	667	CNT	×	✓	52.8	+25
	0.5	0.015/10	667	CNT	×	×	21	-9.1
Sassani et al. [152]	0.1	7.2/6000	833	FC	×	✓	65	0
		7.2/12000	1667					
	1	7.2/6000	833	FC	×	✓	60	-7.7
		7.2/12000	1667					

<sup>a</sup> respecto al peso en cemento; <sup>b</sup> diámetro/longitud

Diversos autores han estudiado las propiedades de resistencia a compresión y resistividad tratando de entender la relación. En este sentido, se sabe que la zona de la interfase de transición juega un papel importante en la resistencia final del hormigón, es por ello que se opta en algunos casos por mejorarla mediante tratamientos superficiales de las fibras. Sin embargo, no es un parámetro significativo en la determinación de la resistividad. Se ha observado que solamente en dosificaciones similares o iguales se puede obtener una relación más directa debido a la relación entre la permeabilidad y la resistencia a compresión. Lübeck et al. [153] obtuvieron relaciones aproximadamente lineales entre resistencia a compresión y resistividad con morteros de cemento Portland blanco, ya que ambas están relacionadas con la porosidad a edades tempranas. A edades más avanzadas influyen también otros factores como la conductividad de la red porosa y el grado de saturación.

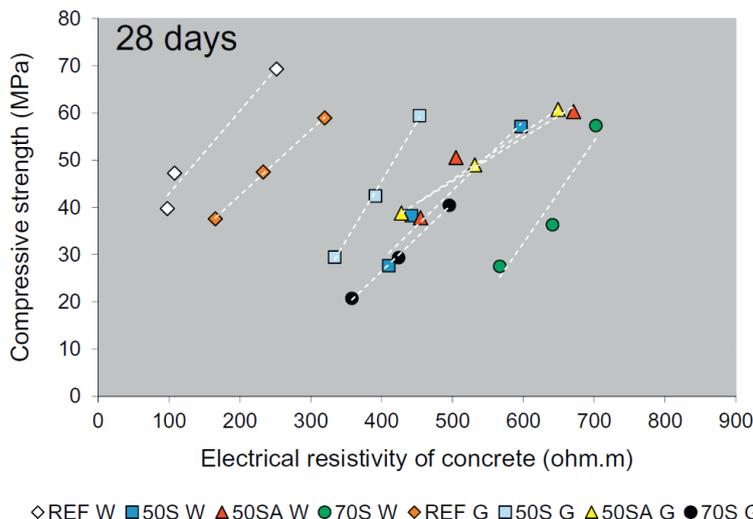


Figura 5.16 Relación resistencia a compresión-resistividad. S: escorias; W: cemento blanco; A: activador; G: cemento gris. Los números indican el porcentaje de S.

### 5.4.2 Apantallamiento de interferencias electromagnéticas (EMI)

Una de las posibles aplicaciones de los hormigones conductores es la de apantallamiento de interferencias electromagnéticas (EMI). Esta aplicación y sus fundamentos se detallan más profundamente en el apartado 5.5.5, no obstante, en este apartado se presentan los datos obtenidos de diversos estudios realizados con morteros de cemento y distintos tipos de adiciones carbonosas. La Tabla 5.6 resume algunos de los estudios llevados a cabo con matrices cementicias y diferentes tipos de fibras conductoras.

Tabla 5.6 Diferentes estudios realizados con morteros de cemento y fibras para protección EMI.

Referencia	Fibras empleadas			Relación de aspecto	Frecuencia (GHz)	Protección (dB)	Mecanismo predominante
	% fibras	Material	d/l (µm) <sup>a</sup>				
Chiou et al. [154]	2	Carbono	12/3000	250	1	16	-
	2	Carbono	12/3000	250	1.5	15	-
	2	Carbono	12/3000	250	2	22	-
	4	Carbono	12/3000	250	1	21	-
	4	Carbono	12/3000	250	1.5	19	-
	4	Carbono	12/3000	250	2	25	-
Fu y Chung [151]	0	-	-	-	1	4.5	Reflexión
	1.5	Carbono	0.1/>100	>1000	1	40	Reflexión
Wen y Chung [155]	3.6	Acero	8/6000	750	1	60	Reflexión
	3.6	Acero	8/6000	750	1.5	70	Reflexión
Singh et al. [156]	0-15	Carbono	0.06/15	250	8.2-12.4	3-29	Absorción

<sup>a</sup> diámetro/longitud de las fibras empleadas

Wen y Chung [155] emplearon fibras de acero inoxidable nº 304 con una relación agua cemento de 0.4 y una cantidad de humo de sílice del 15% en peso de cemento para ayudar a la dispersión de las fibras junto con alcohol polivinílico (PVA) en un porcentaje del 10% respecto al peso de fibras

(47% vol.). Así mismo determinaron que tanto la presencia de las barras de armadura como la presencia de arena en la dosificación no influyen significativamente en la protección EMI del material.

Chiou et al. [154] emplearon en las dosificaciones fibras de breá como material precursor y agentes químicos para acelerar la reacción del cemento, ayudar en la dispersión de las partículas de cemento y solutizar más fácilmente las partículas de cemento. Emplearon una relación de agua/cemento de 0.5 y una relación de arena/cemento de 1:1 en pesos.

Singh et al. [156] emplearon nanotubos de pared múltiple en un mortero solamente con cemento y agua en una proporción de 1:0.6 con probetas de 2 mm de espesor. Estudiaron el efecto de distintas cantidades de nanotubos de carbono en el apantallamiento EMI debido al mecanismo de reflexión y absorción, así como diferentes frecuencias de radiación incidente. Los resultados fueron concordantes con la bibliografía siendo el mecanismo predominante el de absorción y aumentando su efecto con el incremento de la frecuencia de la radiación incidente (véase Figura 5.17)

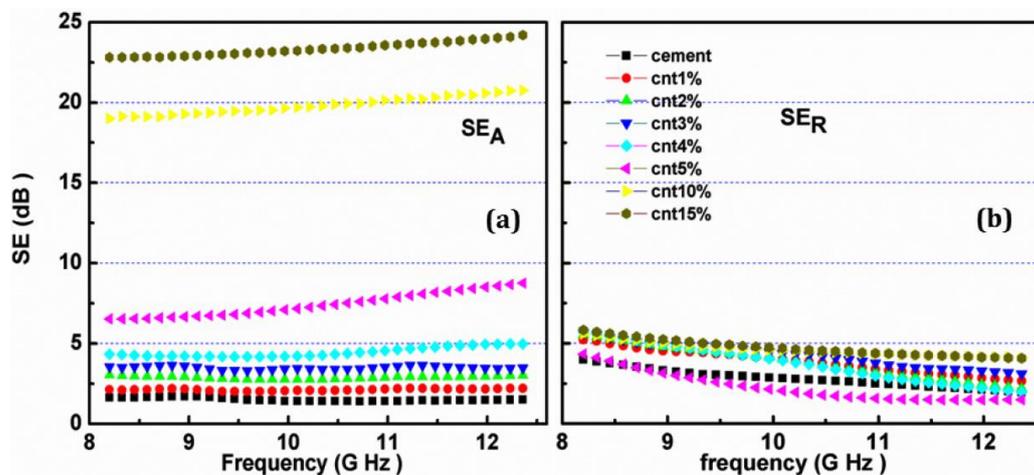


Figura 5.17 Relación de la efectividad del apantallamiento por absorción ( $SE_A$ ) y reflexión ( $SE_R$ ) con la frecuencia (8-12.4 GHz) y contenido de nanotubos (0-15%).

#### 5.4.2.1 Medida del apantallamiento

La atenuación o apantallamiento de las interferencias electromagnéticas (EMI) en una muestra de mortero generalmente se mide mediante el método del cable coaxial o método de pérdidas por inserción (insertion-loss method), el cual sirve para medir tanto el apantallamiento producido por reflexión como por absorción, gracias a la inserción de una probeta en un dispositivo de guiado de ondas electromagnéticas o célula de medida de apantallamiento EMI, conectado mediante cables coaxiales a un analizador espectral (Figura 5.18).

El cable coaxial es un medio de guiado de ondas electromagnéticas, en contraposición a los medios no guiados como las antenas, que está formado por dos conductores paralelos separados por un material dieléctrico construidos de forma que pueden operar sobre un amplio rango de frecuencias.

Una célula de medida apantallamiento EMI es un dispositivo simétrico que prolonga los conductores del cable coaxial al tiempo que aumenta, de forma proporcional, la distancia entre los mismos, con el fin de permitir introducir probetas de dimensiones suficientes para que diversos

materiales puedan ser analizados, especialmente materiales de construcción que, lógicamente, no pueden ser fabricados a muy pequeña escala. La célula de medida apantallamiento EMI confina la propagación de la onda en una dimensión, por lo que en condiciones ideales la onda no pierde potencia durante su propagación.

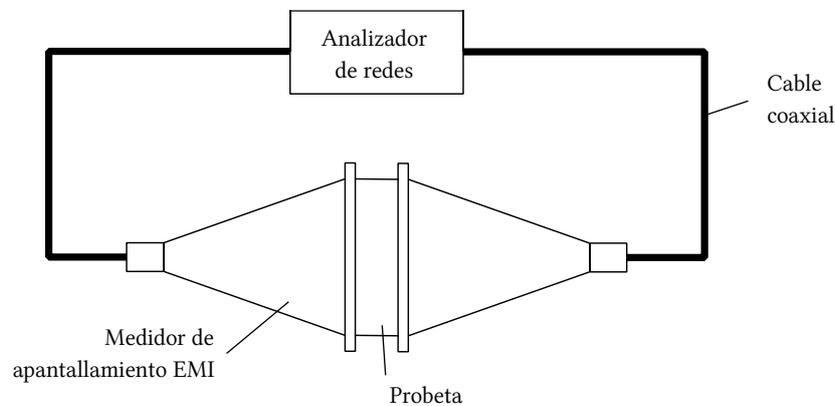


Figura 5.18 Esquema del aparato de medida de apantallamiento EMI.

La efectividad del apantallamiento de una probeta se obtiene mediante el análisis de las pérdidas por reflexión y absorción de ondas electromagnéticas en analizadores vectoriales de redes, entre otros. La norma ASTM D4935-10 describe dicho método, cuyo esquema de funcionamiento queda reflejado en la Figura 5.18, en la que se muestra el analizador de redes (en cuyo interior se encuentra la fuente generadora de ondas electromagnéticas), la célula de medida de apantallamiento EMI (compuesta por dos partes simétricas y encargada de guiar las ondas conservando su planitud, así como de sostener firmemente la probeta objeto de estudio) y los cables coaxiales de conexión entre cada uno de los dos puertos del analizador con la CMA.

### 5.4.3 Durabilidad

Uno de los parámetros más importantes en la determinación de la durabilidad del hormigón es la accesibilidad de las sustancias agresivas ya que está relacionado con el inicio del proceso de corrosión y la velocidad de corrosión en las armaduras. En este sentido, la resistividad eléctrica es una característica importante ya que permite evaluar la accesibilidad de las sustancias agresivas.

La resistividad es una medida de la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y conducir las corrientes de corrosión. Se basa en la idea de que la resistividad es proporcional a la velocidad de corrosión cuando los ensayos de potencial de corrosión indican que es probable que haya corrosión, comprometiendo la durabilidad del hormigón. Es decir, una vez que se destruye la capa pasivada en el acero, la velocidad de corrosión viene determinada por la resistividad eléctrica, que es función del contenido de humedad, y la disponibilidad de oxígeno [157].

La adición de filamentos de carbono se ha visto que persigue y produce una disminución de la resistividad en el hormigón, de modo que se produce un riesgo en el caso de que se emplee armadura de acero dentro del hormigón conductor de que esta se corra. Para ello, la literatura arroja unos valores de la resistividad según el riesgo a la corrosión que existe. Como una estimación general se muestra la **Tabla 5.7** dada en [158].

**Tabla 5.7 Resistividad y riesgo de corrosión en el hormigón.**

Resistividad ( $\Omega\cdot m$ )	Riesgo de corrosión
< 100	Alto
100-500	Moderado
500-1000	Bajo
>1000	Despreciable

Morris et al. [159] apuntan también a que la resistividad eléctrica del hormigón es un parámetro efectivo para evaluar el riesgo de corrosión independientemente del tipo de mezcla y condiciones de exposición. Así mismo, establecen que las barras de acero son propensas a adoptar un estado activo de corrosión cuando la resistividad es menor a 100  $\Omega\cdot m$ , y que tiende a presentar un estado pasivo cuando la resistividad del hormigón es mayor a 300  $\Omega\cdot m$ .

Para tener una muestra de la resistividad ( $\rho$ ) de algunas dosificaciones existentes de hormigones convencionales se presenta la siguiente tabla (Tabla 5.8).

**Tabla 5.8 Resistividad y dosificaciones correspondientes de hormigones convencionales. [153]**

Cemento ( $kg/m^3$ )	Ratios					RC (MPa)	$\rho$ ( $\Omega\cdot m$ ) 28d	$\rho$ ( $\Omega\cdot m$ ) 91d
	EAH	agua	AF	AG	SP			
521	-	0.3	1.24	2.06	1.72	58.9	319.8	487.2
418	-	0.42	1.70	2.5	0.3	47.5	233	358.3
306	-	0.5	2.69	3.42	-	37.6	165.3	256.8
517 <sup>a</sup>	-	0.3	1.24	2.06	1.70	69.3	251.8	352.9
415 <sup>a</sup>	-	0.42	1.70	2.50	0.33	47.2	107.8	143.1
306 <sup>a</sup>	-	0.5	2.68	3.40	-	39.8	97.6	123.2
259 <sup>a</sup>	1	0.3	1.20	2.07	1.46	57.1	596.7	681.2
208 <sup>a</sup>	1	0.42	1.67	2.50	0.27	38.2	442.2	549.2
153 <sup>a</sup>	1	0.5	2.66	3.41	-	27.7	410.2	671.1

EAH: escoria de alto horno; AF: árido fino; AG: árido grueso; SP: superplastificante

<sup>a</sup> cemento Portland blanco

Puede comprobarse que algunas adiciones como la escoria de alto horno aumentan la resistividad del hormigón en gran medida con una sustitución del 50% del cemento, el contenido de agua disminuye la resistividad y la utilización de cemento Portland blanco también. Así mismo, la edad es otro factor que es directamente proporcional a la resistividad en un determinado hormigón.

Garcés et al. [160] obtuvieron la intensidad de corriente ( $I_{corr}$ ) en morteros con distintos contenidos de fibras de carbono en función del tiempo (Figura 5.19). Las muestras se sometieron a un proceso de carbonatación acelerado durante 75 días, tras lo cual se observaron unos valores iniciales de  $I_{corr}$  altos que disminuyeron y se estabilizaron con el tiempo. A los 30 días, las muestras se sumergieron parcialmente en agua destilada, provocando un incremento de los valores de  $I_{corr}$  que también disminuyeron y se estabilizaron en el tiempo. Se observa que los valores de  $I_{corr}$  son mayores

para las muestras con mayor contenido de fibras de carbono, siendo 0.477, 0.623, 0.64, 0.69 y 0.703 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) para contenidos de fibras de carbono de 0, 0.5, 1, 3 y 5 respectivamente.

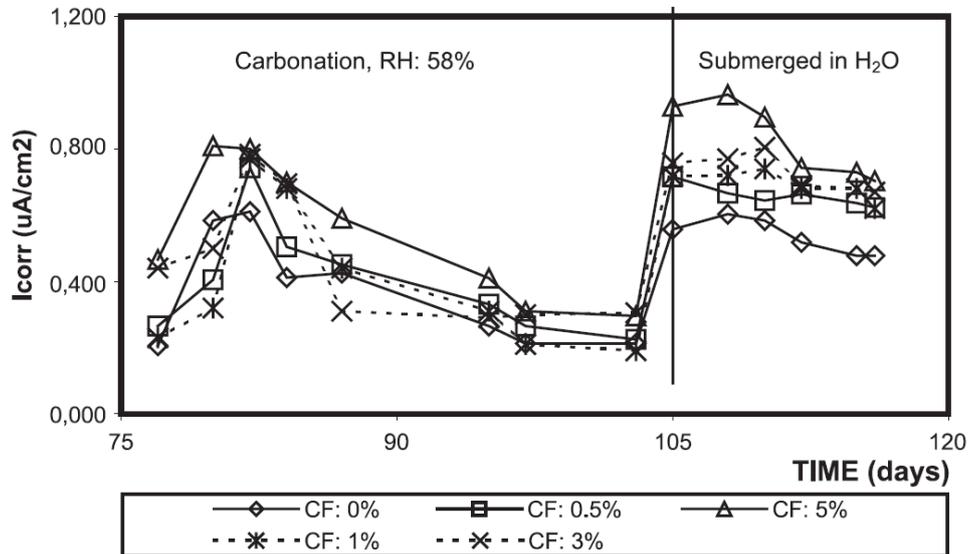


Figura 5.21 Evolución de  $I_{corr}$  de las armaduras en morteros con distintos contenidos de fibra de carbono.

Tanto la velocidad de corrosión como la pérdida de masa son función de la intensidad de corriente según la Ecuación 5.2 y Ecuación 5.3 respectivamente:

$$V (\text{mol}/\text{cm}^2) = \frac{I_{corr}}{n \cdot F} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$W (\text{g}/\text{cm}^2) = \frac{I_{corr} \cdot M \cdot t}{n \cdot F} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

$I_{corr}$ : intensidad de corriente ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

$n$ : número de electrones implicados en la reacción

$F$ : constante de Faraday ( $96.500 \text{ C}/\text{mol}$ )

$M$ : masa atómica del elemento involucrado ( $\text{g}/\text{mol}$ )

$t$ : tiempo (s)

La relación entre la  $I_{corr}$  y la resistividad ( $\rho$ ) ha resultado ser una relación lineal según diversos estudios [161]. Aunque con gran dispersión, Andrade y Alonso [162] proponen una expresión empírica para dicha relación (Ecuación 5.4). Así mismo, determinaron que la corrosión era despreciable para valores de  $I_{corr}$  inferiores a  $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

$$I_{corr} (\mu\text{A}/\text{cm}^2) = \frac{3 \times 10^4}{\rho (\Omega \cdot \text{cm})} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

La correlación existente entre la tasa de corrosión y la resistividad del hormigón es evidente, no obstante, presenta gran dispersión debido a la influencia de numerosos factores como las condiciones de humedad, el contenido de sales, disponibilidad de oxígeno y temperatura entre otros [161].

Además de en la tasa de corrosión, la resistividad también está relacionada con la penetración de cloruros mediante una relación de proporcionalidad inversa. Es decir, una menor resistividad se traduce en una difusión más acelerada de los cloruros [161]. Así mismo, también se puede establecer una relación indirecta entre la resistividad y la resistencia a compresión a través de la porosidad a edades tempranas del hormigón. Sin embargo, a edades más avanzadas tanto la conductividad de la red de poros como el grado de saturación del hormigón influyen en la relación y no existe en la literatura ninguna relación práctica entre la resistencia a compresión y la resistividad.

## 5.5 Aplicaciones<sup>38</sup>

### 5.5.1 Función de percepción de la deformación

La percepción de deformaciones, relacionada también con la percepción de tensiones, puede aplicarse en aspectos como el control de vibración estructural, monitorización y control del tráfico. Por ejemplo, podría emplearse para medir el peso de camiones en movimiento, monitorización de ocupación de una edificación mediante el peso de los usuarios, pudiendo utilizar la información en sistemas domóticos de iluminación, ventilación o climatización, con los correspondientes ahorros de energía.

Se ha observado que los materiales cementicios con una adición de fibras cortas de carbón son capaces de percibir su propia deformación mediante las variaciones producidas en su resistividad eléctrica. Es decir, se ha comprobado que al someter el material a esfuerzos de tracción se obtiene un aumento de la resistividad, mientras que para esfuerzos de compresión la resistividad disminuye (Figura 5.22). Esto es debido al arrancamiento de fibras dentro de la matriz al fisurarse la matriz sometida a tracción y al reacoplamiento de las fibras cuando se somete la pieza a compresión. Este

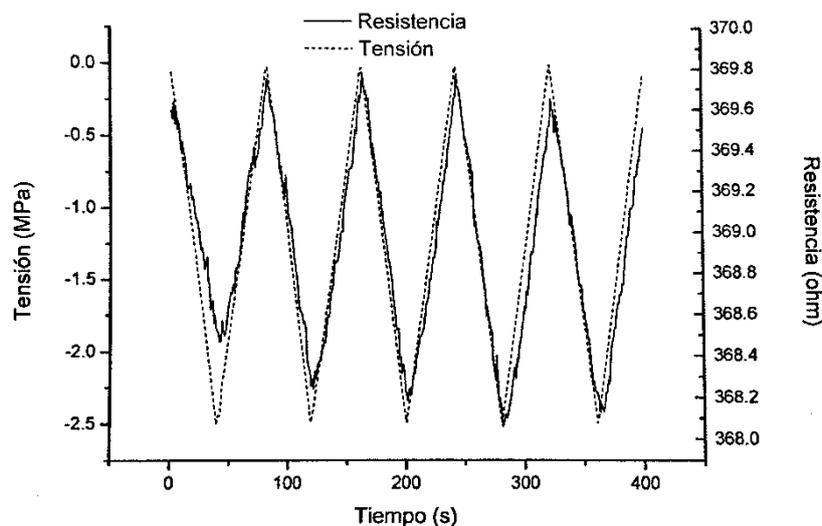


Figura 5.22 Evolución de la resistencia eléctrica en función de la tensión a compresión de un mortero con 5% (respecto masa de cemento) de negro de carbón.

<sup>38</sup> Fuente: [142]

fenómeno electromecánico se conoce como *piezorresistividad*, y permite utilizar medidas de resistencia eléctrica (DC o AC) para monitorizar el estado de deformación de probetas, actuando el propio material cementicio como sensor de deformación.

Así mismo, se han utilizado pastas conductoras como sensores para monitorizar las deformaciones de una viga. Estos se han situado en la cara de compresión de la viga, obteniéndose buenos ajustes, aunque con ruido debido a la discontinuidad entre viga y sensor.

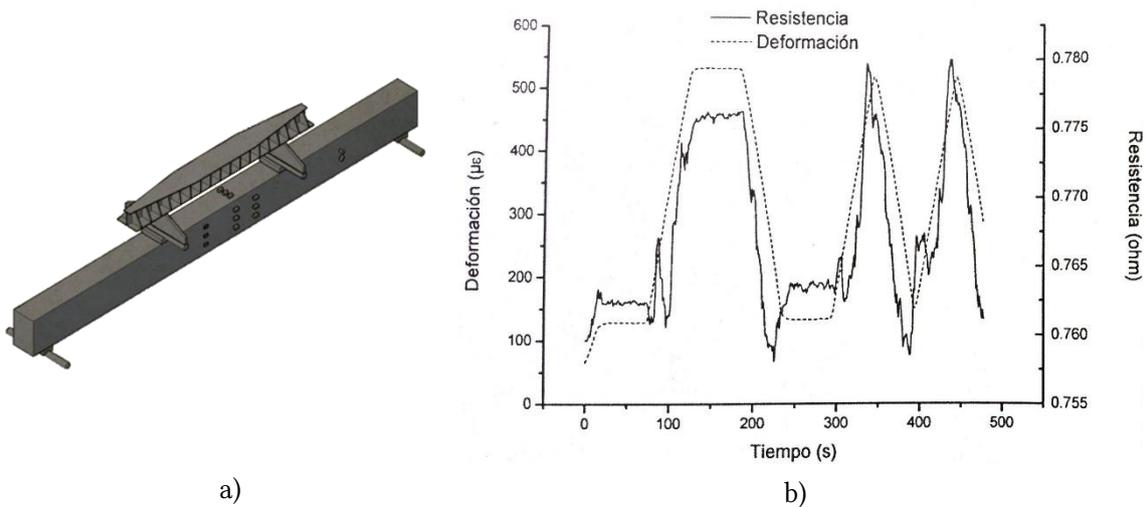


Figura 5.24 (a) Esquema de monitorización de una viga a flexión mediante galgas de pasta de cemento conductoras; (b) Resistencia de una galga de pasta de cemento con fibras de carbón frente a su deformación longitudinal.

## 5.5.2 Monitorización del tráfico en movimiento

La monitorización del tráfico es parte esencial de la gestión y control del tráfico, implica la visualización en tiempo real del mismo, necesitando de sensores de deformación, que pueden ser ópticos, eléctricos, magnéticos o acústicos. Habitualmente los sensores se encuentran adheridos o embebidos en las vías de transporte que se quieren monitorizar. Sin embargo, estos sensores tienen un alcance limitado, escasa durabilidad y un coste demasiado elevado como para permitir un uso extensivo de los mismos. Gracias al hormigón conductor, se puede utilizar el hormigón del firme como sensor, sin necesidad de sensores adheridos o embebidos. Puesto que el propio material estructural es el sensor, se puede controlar la infraestructura completa, con una gran durabilidad y un pequeño incremento de coste, solucionando las tres limitaciones expuestas anteriormente para los sensores tradicionales.

El ensayo llevado a cabo, tal y como se ve en la Figura 5.25, consiste en un montaje de una rueda vertical que simula la rueda de un vehículo que gira sobre la superficie de dos cilindros horizontales de hormigón que hacen las veces de firme. Uno de los cilindros estaba realizado con hormigón conductor autosensible, en el cual se mide la resistencia eléctrica superficial del hormigón mientras está girando. Así, se puede variar tanto la carga aplicada (peso del vehículo) como la velocidad de rotación que se corresponde con la velocidad de circulación.

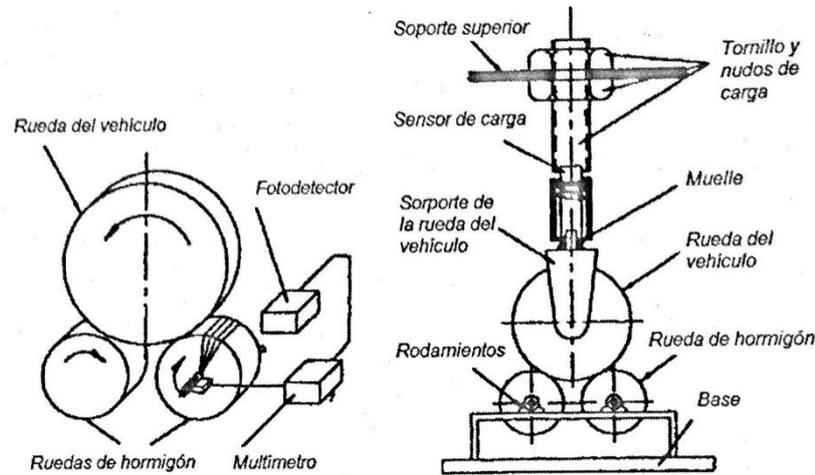


Figura 5.25 Esquema del ensayo de monitorización del tráfico.

Al deformarse el rodillo durante el ensayo se ve como un aumento en la carga aplicada aumenta la tensión que soporta el rodillo, con el consecuente aumento de su deformación, que se ve registrado por una disminución de su resistencia eléctrica. En la Figura 5.26 a) se observa el efecto de aumentar la magnitud de una carga estática en un hormigón con fibra de carbón al 1% en peso de cemento y, en la b), el efecto de tres cargas distintas en movimiento con velocidad variable. Se puede comprobar que la velocidad no es una variable que afecte al resultado obtenido, ya que la resistencia se mantiene constante.

En general, al aumentar la tensión disminuye la resistencia del hormigón, al igual que al aumentar el contenido de fibra. Además, la correlación tensión-resistencia eléctrica es mejor a mayor contenido de fibras, aunque a un mayor coste económico.

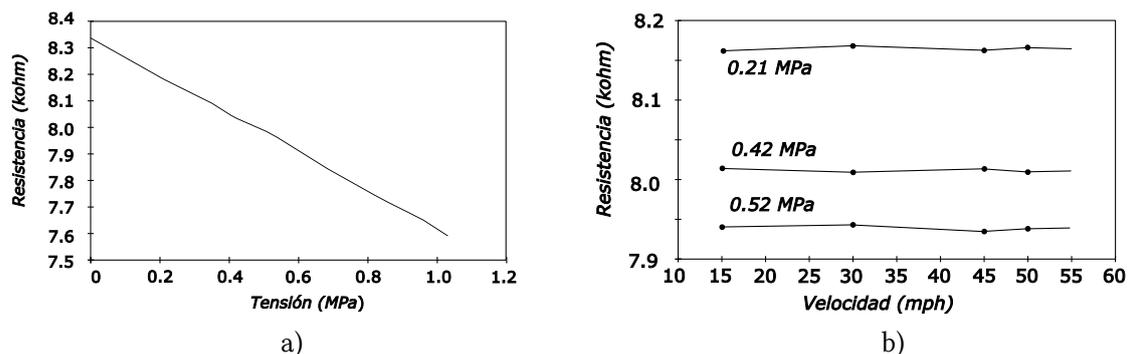


Figura 5.26 Para un hormigón con fibra de carbón del 1% en peso de cemento influencia en la resistencia eléctrica por efecto de (a) la tensión y (b) la velocidad

### 5.5.3 Medida de la temperatura

Las estructuras de hormigón como edificios, autopistas, puentes y pistas de aterrizaje necesitan medir la temperatura para el control térmico, ahorro de energía, reducción de riesgos y el control

preventivo de una estructura. La percepción de la temperatura normalmente se lleva a cabo mediante termómetros, termistores o termopares en forma de dispositivos que se adhieren o embeben en una estructura de hormigón. Sin embargo, el uso propio del hormigón para la percepción de la temperatura reduce costes, mejora la durabilidad y permite que esta capacidad sea global de la estructura y no puntual.

Los materiales compuestos de hormigón usados para la percepción de la temperatura contienen fibras conductoras cortas en una proporción inferior al umbral de percolación, de forma que las fibras no se llegan a tocar unas con otras. Aunque el empleo de fibras aumenta el coste del material compuesto, dicho coste permanece bajo en comparación con el que implica el uso de dispositivos para medir la temperatura.

Un material compuesto de cemento con fibras de carbón cortas se comporta como un termistor. Es decir, un material cuya resistividad eléctrica disminuye cuando la temperatura aumenta. Normalmente se emplean semiconductores, pero en este caso la pasta de cemento podría hacer esta función.

Los termopares se basan en el efecto Seebeck, un efecto termoeléctrico que implica el movimiento de portadores de carga de un punto caliente a un punto frío en el material, lo cual produce una diferencia de potencial entre ambos puntos.

La pasta de cemento con adición de humo de sílice y fibras de acero (1% respecto masa de cemento) es especialmente atractiva para la medida de temperatura ya que tiene un elevado valor de potencia termoeléctrica ( $-68 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) y el efecto Seebeck en este material es lineal y reversible. Esta potencia termoeléctrica es comparable a la de otros materiales comerciales que se emplean con este fin. Uniendo dos pastas de cemento distintas se puede obtener un termopar con una sensibilidad de  $70 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Estas pastas de cemento distintas se formarían preferiblemente con una pasta de cemento con fibras de acero (análogo a un semiconductor tipo N) y otra pasta de cemento con fibras de carbón (análogo a un semiconductor tipo P).

#### 5.5.4 Pavimento calefactor para deshielo

Debido a los grandes impactos negativos de los químicos utilizados contra el hielo en el medio ambiente, seres humanos y los materiales de construcción, un pavimento calefactor que controle el hielo y la nieve en las carreteras se presenta como una alternativa interesante, más aún en regiones frías. Las fibras de carbono comerciales empleadas normalmente para hormigones calefactores contra el hielo, incluyendo asfalto y cemento, han sido ampliamente investigadas, sin embargo, presentan un consumo eléctrico muy elevado, de modo que la aplicación de esta tecnología ha sido limitada [163].

Debido al descenso de los costes de fabricación de las nanoestructuras de carbono y, especialmente de las nanofibras de carbono, se han estudiado para fabricar un pavimento calefactor para el deshielo. Esto es posible debido al efecto Joule, mediante el cual, cuando una corriente eléctrica circula por un conductor (en este caso el hormigón), parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura [163].

Además de los estudios numéricos, los estudios experimentales llevados a cabo demuestran una gran eficiencia de los nanotubos en el deshielo. En la Figura 5.27, se muestra un sistema de pavimento diseñado para obtener una gran eficiencia de calefacción para con el deshielo. Este sistema se compone de los siguientes elementos [164]:

- *Fuente térmica:* en este caso se seleccionó una fuente térmica de un material compuesto de nanofibras de carbono de 10-200 nm dentro de una matriz polimérica. El polímero de nanofibras de carbono (CNFP) se conecta a unos electrodos que inducen la electricidad mediante unos cables conectados a un controlador de potencia. Estos electrodos estaban realizados con una resina conductora y tenían una resistividad eléctrica de  $0.6 \Omega \cdot \text{mm}$ . Dimensiones:  $100 \times 100 \times 0.38 \text{ mm}$ .
- *Base aislante:* esta base se realizó con una resina epóxica para aislar térmicamente el sistema de pavimento calefactado del terreno y evitar la transferencia del calor generado al terreno, con un espesor de 2 mm.
- *Aislante eléctrico:* este consiste en una lámina de cerámica de 0.5 mm de espesor que aísla eléctricamente la fuente térmica ( $1.5 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ ) y mejora la eficiencia de la transferencia de calor ya que es térmicamente conductora ( $175 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ).
- *Capa conductora:* es la encargada de conducir el calor para fundir el hielo o la nieve que se deposita sobre ella y proporcionar la resistencia mecánica al pavimento. Se trata de un compuesto cementicio realizado con nanotubos de carbono de pared múltiple de  $<50 \text{ nm}$  de diámetro. Los nanotubos fueron dispersados previamente en una solución acuosa con un 0.1% (en peso de cemento) de dodecilsulfato sódico. Dimensiones:  $100 \times 100 \times 25 \text{ mm}$ .

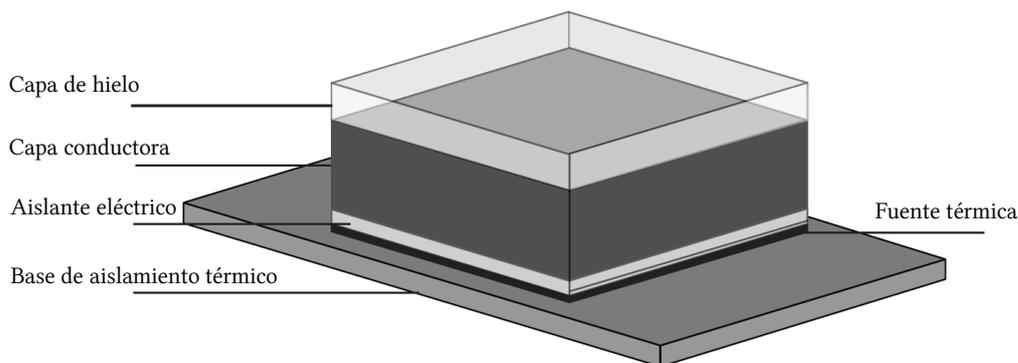


Figura 5.27 Esquema de composición de un pavimento calefactor.

Los resultados demostraron que el compuesto de cemento y nanotubos de carbono (3%) tenía una mayor conductividad térmica ( $2.83 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) que el compuesto formado de cemento y fibras de carbono ( $1.3\text{-}2.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) y el hormigón convencional ( $1.58 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ).

Con este sistema, para un flujo de calor de  $600 \text{ W/m}^2$ , la capa de nieve con una profundidad de 20, 30, 40 y 50 mm se puede fundir en 1h 40 min, 1h 48 min 20 s, 2 h 5 min, 1 h y 53 min 20 s con temperaturas ambiente de  $-9.1$ ,  $-9.2$ ,  $-9.7$  y  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Los consumos correspondientes fueron  $1.0$ ,  $1.12$ ,  $1.28$ , y  $1.10 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$ , respectivamente. Comparando los costes con anteriores estudios, este pavimento multicapa tiene un coste mucho menor ( $0.12\text{-}0.15 \text{ €/m}^2$ ) que los hormigones con fibra de carbono o acero hasta  $0.5$  y  $0.1\text{-}0.16$ .

Tang et al. [165] realizaron un pavimento similar para el deshielo empleando fibras de carbono de 10 mm de longitud y 0.3 mm de espesor con un contenido de 1.5% en peso de cemento. En el ensayo la muestra tenía unas dimensiones de 400×400×40 mm y obtuvieron un consumo de 1.462 kW·h/m<sup>2</sup> para fundir un espesor de la capa de hielo de 6 mm en 2 horas con una potencia calorífica de 725 W/m<sup>2</sup>.

En la capacidad de deshielo intervienen diversos factores como el espesor de la capa de hielo/nieve, la temperatura ambiente, la densidad de flujo de calor y la velocidad del viento. Por ejemplo, el tiempo de deshielo aumenta linealmente con el espesor de la capa de hielo y disminuye de forma hiperbólica en función de la densidad de flujo de calor y linealmente con la temperatura del aire [164].

### 5.5.5 Protección electromagnética<sup>40</sup>

Los materiales cementicios eléctricamente conductores son también útiles para el apantallamiento de interferencias electromagnéticas (EMI). Esta aplicación se refiere a la capacidad de los materiales para la protección de la radiación electromagnética, los cuales evitan que éstas atraviesen el material. Este tipo de aplicaciones están adquiriendo mucha importancia en la sociedad actual ya que en los últimos años se ha incrementado de forma muy significativa el uso de dispositivos electrónicos sensibles a las interferencias de radiaciones ambientales (particularmente las radiofrecuencias), las cuales también han experimentado una mayor presencia en el entorno debido a la proliferación de dispositivos inalámbricos. El apantallamiento es particularmente necesario en construcciones de uso eléctrico subterráneas que contengan transformadores y otros componentes electrónicos que sean importantes para las centrales eléctricas y las telecomunicaciones [139].

Es necesario distinguir entre apantallamiento EMI y apantallamiento magnético. Mientras el primero hace referencia a radiación de alta frecuencia, el segundo es eficaz con campos magnéticos de baja frecuencia (por ejemplo, 60 Hz).

La matriz de cemento se comporta como un dieléctrico, por lo que es un mal conductor, esto provoca la necesidad de introducir algún material como adición, que sea conductor de la electricidad para que se produzca dicho apantallamiento de la radiación electromagnética.

En el apantallamiento de interferencias electromagnética (EMI) intervienen dos mecanismos, que son, por un lado, la reflexión de las ondas electromagnéticas y, por otro lado, la absorción de la radiación:

- *Mecanismo de reflexión de ondas:* para que se produzca este primer mecanismo de apantallamiento EMI, el material debe tener cargas en movimiento (electrones), las cuales interactúan con los campos electromagnéticos de la radiación incidente. Es decir, que para que se produzca la reflexión, el material debe ser conductor de la electricidad. Esto no significa que un material que sea más conductor que otro tenga mayor nivel de apantallamiento de ondas electromagnéticas (una resistividad volumétrica de 1 Ω·cm es suficiente).

---

<sup>40</sup> Fuente: [139]

- *Mecanismo de absorción de radiación:* para que se produzca este segundo mecanismo de apantallamiento EMI el material debe tener dipolos magnéticos y/o eléctricos, que interactúen con los campos electromagnéticos. Los dipolos eléctricos permiten obtener un elevado valor de la constante dieléctrica del material, mientras que los magnéticos ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) permiten alcanzar un gran valor de permeabilidad magnética. La permeabilidad magnética es la capacidad de un medio para atraer y hacer pasar a través de ella los campos magnéticos. Su cálculo viene dado por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material.
- *Apantallamiento por reflexión múltiple:* Además de la reflexión y la absorción, se puede producir el mecanismo de apantallamiento por reflexión múltiple, el cual hace referencia a las reflexiones en varias superficies o caras internas en el material. Este mecanismo requiere la presencia de una gran superficie específica del material. Un ejemplo de un material de esta naturaleza sería un material poroso o un compuesto que contenga una adición de gran superficie específica. La pérdida debido a reflexiones múltiples se puede despreciar cuando la distancia entre las superficies o caras internas reflectantes es elevada en comparación con la profundidad de las mismas.

Por otro lado, la pérdida por absorción es función del producto tal  $\sigma_r \cdot \mu_r$ , mientras que la pérdida por reflexión es función del cociente  $\sigma_r / \mu_r$ , siendo  $\sigma_r$  la conductividad relativa respecto del cobre y  $\mu_r$  la permeabilidad magnética relativa. La plata, el cobre, el oro y el aluminio son excelentes materiales para la reflexión debido a su alta conductividad. Materiales como *superpermalloy* y *mu-metal* son excelentes para la absorción debido a su gran permeabilidad magnética. La pérdida por reflexión disminuye con el aumento de la frecuencia incidente, mientras que la pérdida por absorción aumenta con el aumento de la frecuencia.

La radiación electromagnética de alta frecuencia solamente penetra en una profundidad pequeña cercana a la superficie en un material conductor, este efecto se conoce como el efecto piel. El campo eléctrico de una onda plana penetrando en un conductor disminuye exponencialmente con la profundidad del conductor (Figura 5.28 [156]).

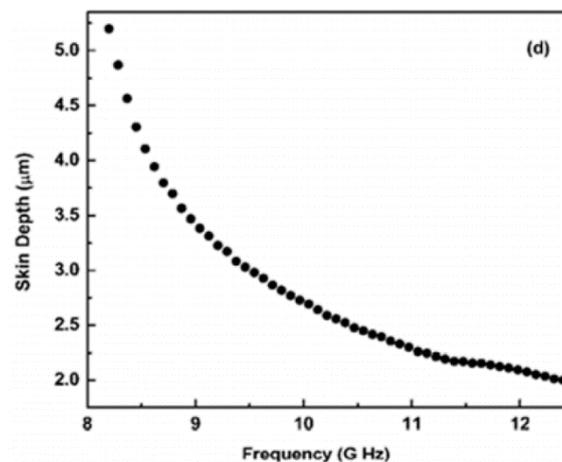


Figura 5.28 Disminución de la profundidad de piel con la frecuencia de la radiación incidente.

La profundidad a la cual la amplitud de la onda incidente disminuye en un factor de  $e$  (2.718) se denomina *profundidad de piel* ( $\delta$ ), la cual se expresa como:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

$\delta$ : profundidad de piel (m)  
 $f$ : frecuencia de la radiación (Hz)  
 $\mu$ : es la permeabilidad magnética del conductor (H/m)  
 $\sigma$ : conductividad eléctrica del material ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  o S/m)

Una menor profundidad de piel se traduce en una protección debida en mayor medida a la reflexión.

Las pérdidas, ya sean debidas a reflexión, absorción o reflexiones múltiples, se expresan normalmente en dB. En general, la onda transmitida será la diferencia de la onda incidente menos la reflejada y menos la absorbida. La suma de todas las pérdidas es la efectividad de apantallamiento, que se expresa normalmente en dB. La pérdida por absorción es directamente proporcional al espesor del material. La efectividad de un apantallamiento S está definida por la atenuación de los campos eléctricos y magnéticos (Ecuación 5.6):

$$S = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{E_0}{E_1} \right) \quad S = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{H_0}{H_1} \right) \quad \text{Ecuación 5.6}$$

$E_0, E_1$ : intensidad incidente y saliente del campo eléctrico  
 $H_0, H_1$ : intensidades incidente y saliente del campo magnético

Garcés et al. [139] afirman que la relación de aspecto de las fibras empleadas es un parámetro crítico a la hora de mejorar el comportamiento de apantallamiento del material compuesto, y que en términos de coste puede resultar más interesante aumentar la relación de aspecto que aumentar la cantidad de material carbonoso para obtener un mejor rendimiento del material compuesto ya

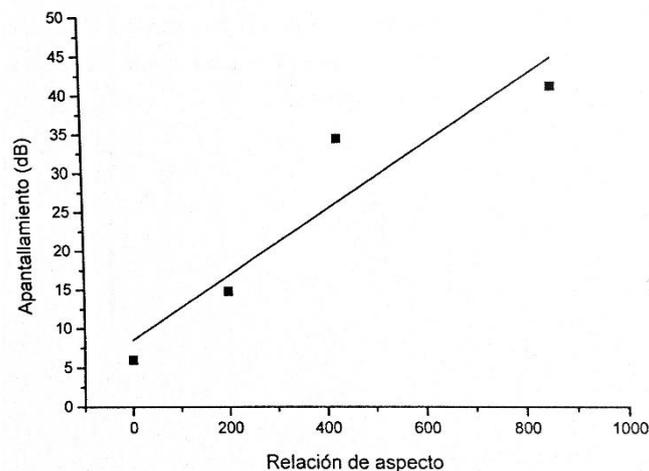


Figura 5.29 Relación apantallamiento EMI y relación de aspecto de las fibras.

que estas adiciones son la parte que más encarece el producto final. La Figura 5.29 muestra la dependencia entre el apantallamiento EMI a 1.0 GHz con respecto a la relación de aspecto (longitud/diámetro) de las fibras (1% en peso de cemento) en probetas de pasta de cemento de 4 cm de espesor.

## 5.6 Conclusión

Los materiales cementicios como el hormigón han recibido gran atención a consecuencia de sus propiedades mecánicas y de su importancia como materiales estructurales. Sin embargo, se reconoce continuamente la necesidad de un material estructural capaz de contener funciones no estructurales reteniendo buenas propiedades estructurales. Esta es una tendencia cada vez más extendida y, más aún con los materiales cementicios. Esto es debido a que el uso de un material estructural multifuncional en lugar de una combinación de materiales estructurales no funcionales y materiales funcionales no estructurales, reduce costes, mejora la durabilidad y la capacidad de reparación, aumenta el volumen funcional, evita la degradación de las propiedades mecánicas y simplifica el diseño [139].

Una de las categorías de materiales cementicios multifuncionales son los materiales cementicios eléctricamente conductores. La conductividad eléctrica es interesante para tomas de tierra, protección antirrayos, calefacción por resistencia (función de deshielo y calentamiento de edificios), disipación de carga estática, autopistas inteligentes, protección de interferencias electromagnéticas, generación de energía termoeléctrica y para contactos eléctricos usados en la protección catódica de las barras del hormigón armado.

Para obtener las funciones anteriormente citadas generalmente no se necesitan más del 5% de adiciones conductoras respecto al contenido de cemento. Estas adiciones generalmente son productos derivados del carbono, aunque en algunos casos también se han empleado fibras metálicas de acero. Esto es así debido a las excelentes propiedades térmicas, eléctricas y resistentes de las adiciones o filamentos de carbono no alcanzadas por el acero Tabla 5.9.

**Tabla 5.9 Propiedades térmicas, eléctricas y resistentes típicas de algunos materiales.**

Filamento	Densidad relativa	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistividad ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	Conductividad térmica ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )
Fibra de carbono	1.6-1.7	500-4000	30-500	$(1-5)\times 10^{-3}$	8-1000
CNF	1.4-1.6	8700	600	$5\times 10^{-5}$	2000
CNT	1.35	11000-63000	300-1100	$10^{-7}-10^{-6}$	2000-6000
Cobre	8.92	200-400	80-110	$1.7\times 10^{-6}$	400
Acero	7.85	350-700	195-210	$2\times 10^{-5}$	50

Entre las adiciones de carbono las más habituales han sido hasta el momento las fibras de carbono, nanofibras de carbono y nanotubos de carbono. Siendo estos últimos los que mejores características tienen y mayores efectos favorables han producido en su incorporación a las matrices cementicias. Sin embargo, el empleo de estas fibras o nanotubos tan pequeños del orden de unos pocos nanómetros de diámetro y algunas decenas de micras presenta dificultades en su dosificación

debido a los nódulos aglomerados de nanotubos que se forman en la pasta de cemento (Figura 5.31 [149]). Por ello es muy conveniente emplear algún tipo de agente de dispersión o tratamiento como por ejemplo metilcelulosa, humo de sílice, sonicación o tratamiento con ácido de los nanotubos. Además, existe en los nanotubos un posible riesgo para la salud que aún no se ha estudiado lo suficiente pero que parece que es debido al reducido tamaño de estas partículas, su forma de aguja y gran rigidez, lo que provoca efectos cancerígenos parecidos a las fibras de asbesto.

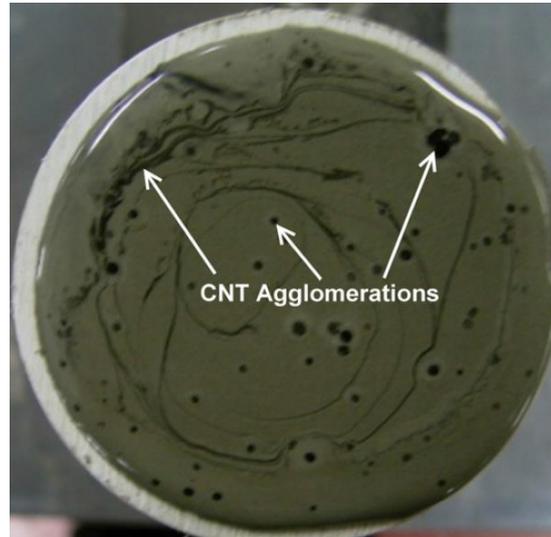


Figura 5.31 Pasta de cemento en estado fresco con aglomeraciones de nanotubos.

Por otro lado, los áridos en general tienen una mayor resistividad eléctrica que la pasta de cemento endurecida debido a su menor porosidad, es decir que la corriente eléctrica circula más fácilmente por la red de poros de la pasta de cemento. Por tanto, el aumento de la cantidad de áridos, así como su tamaño supone un aumento de la resistividad del hormigón. Por este motivo, al comparar las resistividades de dos hormigones diferentes hay que tener en cuenta el contenido de áridos, así como el tamaño de los mismos.

## Capítulo 6. Bibliografía

- [1] S. User, «¿Qué es la radiactividad?», *Foro Nuclear*. [En línea]. Disponible en: <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119402-que-es-la-radiactividad>. [Accedido: 20-feb-2018].
- [2] S. User, «¿Qué sabes de la radiación?», *Foro Nuclear*. [En línea]. Disponible en: <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119909-que-sabes-de-la-radiacion>. [Accedido: 19-feb-2018].
- [3] «2.Radiaciones ionizantes y no ionizantes». [En línea]. Disponible en: [http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/2radiaciones\\_ionizantes\\_y\\_no\\_ionizantes.html](http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/2radiaciones_ionizantes_y_no_ionizantes.html). [Accedido: 19-feb-2018].
- [4] Jing Yang, Zhenfu Chen y Yuanchu Gan, Qiuwang Tao, «Research Progress on Radiation Shielding Concrete», *Appl. Mech. Mater.*, vol. 253-255, pp. 303-307, 2013.
- [5] «Shielding of Neutron Radiation», *Nuclear Power*. [En línea]. Disponible en: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/neutron/shielding-neutron-radiation/>. [Accedido: 20-feb-2018].
- [6] V. Koerting Wiese y C. Queral Salazar, «Energía nuclear y ciclo de combustible. Tema 2: Fisión. Moderación y difusión de neutrones». 2012.
- [7] Daniel R. McAlister, «Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials». PG Research Foundation, Inc., jun-2013.
- [8] «Interaction of Gamma Radiation with Matter», *Nuclear Power*. [En línea]. Disponible en: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/>. [Accedido: 25-feb-2018].
- [9] «Interaction of Gamma Radiation with Matter». .
- [10] Yasmila Herrera Toledo, «Hormigón de muy alta densidad», Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [11] Osman GENCEL, Witold BROSTOW, Cengiz OZEL, Mümin FILIZ, «Concretes Containing Hematite for Use as Shielding Barriers», *Mater. Sci. MEDŽIAGOTYRA*, vol. 16, n.º 3.
- [12] «Nota de prensa: ¿Qué es el uranio empobrecido?»
- [13] W. J. Quapp y L. R. Dole, *Radiation Shielding Using Depleted Uranium Oxide in Nonmetallic Matrices*. 2002.
- [14] V. K. Orlov, Yu. A. Metelkin, y A. A. Maslov, «Extra-heavy concrete and cermet protective materials with enhanced  $\gamma$ -ray absorption», *At. Energy*, vol. 117, n.º nº4, p. 8, feb. 2015.
- [15] S.M.J. Mortazavi, M.A. Mosleh-Shirazi, M.R. Maheri, H.Yousefnia, y S. Zolghadri, A. Hajipour, «Production of an economic high-density concrete for shielding megavoltage radiotherapy rooms and nuclear reactors», *Arch. SID*, vol. 5, n.º 3, p. 4, 2007.
- [16] ACI Committee 304, *Guide for the Use of Preplaced Aggregate Concrete for Structural and Mass Concrete Applications*. 1992.
- [17] Osman GENCEL, Witold BROSTOW, Cengiz OZEL, y Mümin FILIZ, «Concretes Containing Hematite for Use as Shielding Barriers», *Mater. Sci. MEDŽIAGOTYRA*, vol. 16, n.º 3 (2010), p. 7.
- [18] William J. Quapp y Paul A. Lessing, «Radiation Shielding Composition», 6,166,390, 28-jul-1998.

- [19] ACI Committee 304, *Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing*, p. 8.
- [20] Manel Álvarez Paz, «El Hormigón Pesado». 2007.
- [21] Ahmed S. Ouda, «Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding», *Prog. Nucl. Energy*, vol. 79, pp. 48-55, 2015.
- [22] Catherine H. Mattus y Leslie R. Dole, «Durability of Depleted Uranium Aggregates in Concrete Shielding Applications», *ICEM'05 10 Th Int. Conf. Environ. Remediat. Radioact. Waste Manag.*, 2005.
- [23] C. Basyigit *et al.*, «The effect of freezing–thawing (F–T) cycles on the radiation shielding properties of concretes», *Build. Environ.*, vol. 41, pp. 1070–1073, 2006.
- [24] Madeh, «High Density Radiation Shielding Concrete Applications in Construction», *The Constructor*, 28-mar-2017. [En línea]. Disponible en: <https://theconstructor.org/concrete/high-density-concrete-radiation-shielding-applications/16720/>. [Accedido: 19-dic-2017].
- [25] Ary Hoyos, Jorge Tobón, y Yosef Farbiarz, «AVANCES EN EL DESARROLLO DE LOS CONCRETOS TRANSLÚCIDOS», *Rev. Colomb. Mater.*, n.º 5, p. 6.
- [26] A. Karandikar, N. Virdhi, y A. Deep, «Translucent Concrete: Test of Compressive Strength and Transmittance», *Int. J. Eng. Res. Technol. IJERT*, vol. 4, n.º Issue 07, p. 5, jul. 2015.
- [27] Basma F. Bashbash, Roaa M. Hajrus, Doaa F. Wafi, y Mamoun A. Alqedra, «Basics of Light Transmitting Concrete», *Glob. Adv. Res. J. Eng. Technol. Innov.*, vol. 2(3), pp. 076-083, mar. 2013.
- [28] Soumyajit Paul y Avik Dutta, «Translucent Concrete», *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 3, n.º Issue 10, p. 10, oct. 2013.
- [29] Jianping He, Zhi Zhou, Jinping Ou, y Minghua Huang, «Study on Smart Transparent Concrete Product and Its Performances», *6th Int. Workshop Adv. Smart Mater. Smart Struct. Technol.*, jul. 2011.
- [30] Zhi Zhou, Ge Ou, Ying Hang, Genda Chen, y Jinping Ou, «Research and Development of Plastic Optical Fiber Based Smart Transparent Concrete», *SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 7293, p. 6, mar. 2009.
- [31] Camille Sonnenfeld *et al.*, «Microstructured Optical Fiber Sensors Embedded in a Laminate Composite for Smart Material Applications», *Sensors*, vol. 11, pp. 2566-2579, feb. 2011.
- [32] Arquitectura La Salle, «Hormigón translúcido», *LST4 Estructures d'edificació*, p. 7.
- [33] Muhammad Saleem, Mostafa Morsi Elshami, y Muhammad Najjar, «Development, Testing, and Implementation Strategy of a Translucent Concrete-Based Smart Lane Separator for Increased Traffic Safet», *J. Constr. Eng. Manag.*, 2017.
- [34] P. Spiesz, S. Rouvas, y H.J.H. Brouwers, «Utilization of waste glass in translucent and photocatalytic concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 128, pp. 436-448, 2016.
- [35] D.E. Macphee y A. Folli, «Photocatalytic concretes — The interface between photocatalysis and cement chemistry», *Cem. Concr. Res.*, vol. 85, pp. 48–54, 2016.
- [36] Ahmad Shayan y Aimin Xu, «Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs», *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, pp. 457–468, 2006.
- [37] Tung-Chai Ling, Chi-Sun Poon, y Shi-Cong Kou, «Cement and Concrete Research», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, pp. 848–854, 2011.
- [38] Yixin Shao, Thibaut Lefort, Shylesh Moras, y Damian Rodriguez, «Studies on concrete containing ground waste glass», *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, pp. 91-100, 2000.

- [39] Ahmad Shayan y Aimin Xu, «Value-added utilisation of waste glass in concrete», *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, pp. 81–89, 2004.
- [40] Joaquín Díez-Cascón Sagrado y Francisco Bueno Hernández, *Ingeniería de Presas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2001.
- [41] Munther Latif Abdul Hussain, «El desarrollo de las características mecánicas del hormigón fabricado con adiciones de cenizas volantes bajo varias condiciones de curado», Universidad Politécnica de Valencia, 1993.
- [42] C.S. Poon y E. Cheung, «NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials», *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, pp. 1746–1753, 2007.
- [43] John L. Clarke, *Structural lightweight aggregate concrete*. Chapman & Hall, 1993.
- [44] «AIRCRETE - Especificaciones de productos». [En línea]. Disponible en: <http://www.aircrete-europe.com/es/concreto-celular-autoclavado/especificaciones.html>. [Accedido: 03-dic-2017].
- [45] A. M. Neville y J. J. Brooks, *Concrete Technology*, Second Edition. Pearson, 2010.
- [46] Gorka Álvarez, *Hormigón ligero*. CEMEX, 2012.
- [47] Payam Shafigh, Mohd Zamin Jumaat, y Hilmi Mahmud, «Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 1848–1853, 2011.
- [48] European Palm Oil Alliance (EPOA), «Producción del aceite de palma | European Palm Oil Alliance». [En línea]. Disponible en: <http://www.palmoilandfood.eu/es/produccion/C3%B3n-del-aceite-de-palma>. [Accedido: 01-ene-2018].
- [49] Jan Van Dam, «Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa», *Palmas*, vol. 37, n.º Especial, pp. 149-156, 2016.
- [50] M.A. Mannan y C. Ganapathy, «Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS)», *Build. Environ.*, vol. 39, pp. 441 – 448, 2004.
- [51] M. N. Huda, M. Z. B. Jumat, S. Islam, A. B. M, y M. R. Soeb, «Influence of palm oil factory wastes as coarse aggregate species for green lightweight concrete», *Rev. Constr.*, vol. 15, n.º 3, pp. 133-139, dic. 2016.
- [52] B. S. Mohammed, W. L. Foo, K. M. A. Hossain, y M. Abdullahi, «Shear strength of palm oil clinker concrete beams», *Mater. Des.*, vol. 46, n.º Supplement C, pp. 270-276, abr. 2013.
- [53] K. Gunasekaran, R. Annadurai, y P. S. Kumar, «A study on some durability properties of coconut shell aggregate concrete», *Mater. Struct.*, vol. 48, n.º 5, pp. 1253-1264, 2015.
- [54] D. C. L. Teo, M. A. Mannan, y V. J. Kurian, «Durability of lightweight OPS concrete under different curing conditions», *Mater. Struct.*, n.º 43, pp. 1–13, 2010.
- [55] Delsye C. L. Teo, Md. Abdul Mannan, y John V. Kurian, «Flexural Behaviour of Reinforced Lightweight Concrete Beams Made with Oil Palm Shell (OPS)», *Adv. Concr. Technol.*, vol. 4, n.º 3, pp. 459-468, oct. 2006.
- [56] S.H. Perry, P.H. Bischoff, y K. Yamura, «Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete», *Mag. Concr. Res.*, vol. 43, n.º 154, pp. 71-76, 1991.
- [57] H. S. Wilson y V. M. Malhotra, «Development of high strength lightweight concrete for structural applications», *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.*, vol. 10, n.º 2, 1988.
- [58] W.C. Tang, Y. Lo, y A. Nadeem, «Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, pp. 403–409, 2008.

- [59] K. Miled, K. Sab, y R. Le Roy, «Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modelling», *Mech. Mater.*, vol. 39, pp. 222–240, 2007.
- [60] A. Laukaitis, R. Žurauskas, y J. Kerienė, «The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, pp. 41–47, 2005.
- [61] T.Y. Lo y H.Z. Cui, «Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete», *Mater. Lett.*, vol. 58, pp. 916–919, 2004.
- [62] K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan Nambiar, y G. Indu Siva Ranjani, «A classification of studies on properties of foam concrete», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 388–396, 2009.
- [63] C. T. Tam, T. Y. Lim, R. Sri Ravindrarajah, y S. L. Lee, «Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete», *Mag. Concr. Res.*, vol. 39, n.º 138, pp. 12–18, mar. 1987.
- [64] M.R. Jones y A. McCarthy, «Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete», *Fuel*, vol. 84, n.º 11, pp. 1398–1409, 2005.
- [65] M. R. Jones y A. McCarthy, «Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material», *Mag. Concr. Res.*, vol. 57, n.º 1, pp. 21–31, 2005.
- [66] Abdulkadir Kan y Ramazan Demirboğa, «Effect of cement and EPS beads ratios on compressive strength and density of lightweight concrete», *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol. 14, n.º 2007, pp. 158–162.
- [67] Abdulkadir Kan y Ramazan Demirboğa, «A novel material for lightweight concrete production», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 489–495, 2009.
- [68] Ben Sabaa y Rasiah Sri Ravindrarajah, «Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste», presentado en *Advances in Materials for Cementitious Composites*, Faculty of Engineering, University of Technology. Sydney, Australia, 1997.
- [69] S.G. Park y D.H. Chisholm, «Polystyrene Aggregate Concrete», Study report 85, 1999.
- [70] K. Ganesh Babu y D. Saradhi Babu, «Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume», *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, pp. 755–762, 2003.
- [71] K. Ganesh Babu y D. Saradhi Babu, «Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 605–611, 2004.
- [72] D. Saradhi Babu, K. Ganesh Babu, y T.H. Wee, «Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash», *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1218–1223, 2005.
- [73] Shaik Hakeem Thousif Ahmed, V. K. Visweswara Rao, y T. Chandra Sekhara Reddy, «A novel technology for new generation using modified thermocol waste as aggregates in concrete», *Int. J. Civ. Struct. Environ. Infrastruct. Eng. Res. Dev.*, vol. 5, n.º 5, pp. 9–32, 2015.
- [74] D. C. L. Teo, M. A. Mannan, y V. J. Kurian, *Structural Concrete Using Oil Palm Shell (OPS) as Lightweight Aggregate*, vol. 30. 2006.
- [75] M. A. Mannan y C. Ganapathy, «Mix design for oil palm shell concrete», *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, n.º 9, pp. 1323–1325, sep. 2001.
- [76] Z. C. Muda, S. F. A. Sharif, y J. Hong, «Flexural behavior of lightweight oil palm shells concrete slab reinforced with geogrid», *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 3, n.º 11, pp. 2227–2236, 2012.
- [77] M. K. Yew, H. Bin Mahmud, B. C. Ang, y M. C. Yew, «Effects of Oil Palm Shell Coarse Aggregate Species on High Strength Lightweight Concrete», *Sci. World J.*, 2014.
- [78] K. H. Mo, P. Visintin, U. J. Alengaram, y M. Z. Jumaat, «Prediction of the structural behaviour of oil palm shell lightweight concrete beams», *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, n.º Part 1, pp. 722–732, ene. 2016.

- [79] M. Mannan y K. Neglo, «Mix design for oil-palm-boiler clinker (OPBC) concrete», *J. Sci. Technol.*, vol. 30, n.º 1, pp. 111-118, 2010.
- [80] B. S. Mohammed, M. A. Al-Ganad, y M. Abdullahi, «Analytical and experimental studies on composite slabs utilising palm oil clinker concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n.º 8, pp. 3550-3560, 2011.
- [81] K. Gunasekaran, R. Annadurai, y P. S. Kumar, «Study on reinforced lightweight coconut shell concrete beam behavior under flexure», *Mater. Des.*, vol. 46, n.º Supplement C, pp. 157-167, abr. 2013.
- [82] Fritz Leonhardt, *Estructuras de hormigón armado*, 2.ª ed., vol. II, VI vols. El Ateneo, 1984.
- [83] Lucyna Domagała, «The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete», *Procedia Eng.*, vol. 108, pp. 206 – 213, 2015.
- [84] Ministerio de Fomento, Gobierno de España, *Instrucción de Hormigón Estructural*. 2008.
- [85] ACI Committee 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)*. 2005.
- [86] Fahad K. Alqahtani, Gurmel Ghataora, M. Iqbal Khan, y Samir Dirar, «Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate», *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 386-397, 2017.
- [87] ACI Committee 213, *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. 2003.
- [88] C. Albano, N. Camacho, y M. Hernández, «Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios», *Waste Manag.*, pp. 2707-2716, 2009.
- [89] E. Rahmani, M. Dehestani, M.H.A. Beygi, H. Allahyari, y I.M. Nikbin, «On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles», *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1302-1308, 2013.
- [90] Yun-Wang Choi, Dae-Joong Moon, Jee-Seung Chung, y Sun-Kyu Cho, «Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete», *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 776-781, 2005.
- [91] British Standard, *Structural use of concrete, Part 2: Code of practice for special circumstances*. 1985.
- [92] G.J. Zunz, R.A. Heydenrych, y D Michael, «Standard Bank Centre, Johannesburg», *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 48, n.º 2, pp. 195-222, 1971.
- [93] P. H. Bischoff, K. Yamura, y S.H. Perry, «Polystyrene aggregate concrete subjected to hard impact», *Proc. Inst. Civ. Eng.*, vol. 89, n.º 2, pp. 225-239, 1990.
- [94] M. Seifan, A. K. Samani, y A. Berenjian, «Bioconcrete: next generation of self-healing concrete», *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 100, n.º 6, pp. 2591-2602, 2016.
- [95] V. C. Li y E. Herbert, «Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure», *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 10, n.º 6, pp. 207-218, jun. 2012.
- [96] M. Wu, B. Johannesson, y M. Geiker, «A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material», *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, n.º 1, pp. 571-583, mar. 2012.
- [97] C. H. Srinivasa y Venkatesh, «A literature review on engineered cementitious composites for structural applications», *Int. J. Eng. Res. Technol. IJERT*, vol. 3, n.º 12, pp. 531-537, 2014.
- [98] J. Hincapié Luna, Z. Pérez, y C. Camilo, «Comportamiento a flexión de compuestos cementicios de ultra alto desempeño reforzados con fibras de vidrio alcalino-resistentes», feb. 2015.
- [99] «Bendable Concrete Heals Itself -- Just Add Water». [En línea]. Disponible en: <https://news.nationalgeographic.com/news/2009/05/090505-self-healing-concrete.html>. [Accedido: 22-ene-2018].

- [100] S. Qian, J. Zhou, M.R. de Rooij, E. Schlangen, G. Ye, y K. van Breugel, «Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, pp. 613–621, 2009.
- [101] D. Homma, M. Hirozo, y N. Tomoya, «Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites», *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 7, n.º 2, pp. 217-228, 2009.
- [102] R. Mans, «Will autogenous healing seal a concrete crack with a surface width of 0.2mm?», 2012.
- [103] «Autogenous healing». [En línea]. Disponible en: <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=651>. [Accedido: 23-ene-2018].
- [104] X. Hua, «Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in Concrete Repair System», Technische Universiteit Delft, 2010.
- [105] Y. Yang, M. D. Lepech, E. H. Yang, y V. C. Li, «Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles», *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, n.º 5, pp. 382-390, may 2009.
- [106] J. W. C. Pang y I. P. Bond, «A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility», *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65 (11-12), pp. 1791-1799, sep. 2005.
- [107] C. Dry, «Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices», *Smart Mater. Struct.*, vol. 3, n.º 2, p. 118, 1994.
- [108] B. J. Blaiszik, S. L. B. Kramer, S. C. Olugebefola, J. S. Moore, N. R. Sottos, y S. R. White, «Self-Healing Polymers and Composites», *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 40, n.º 1, pp. 179-211, 2010.
- [109] M. J. Martín Villena, M. E. Morales Hernández, V. Gallardo Lara, y M. A. Ruiz Martínez, «Técnicas de microencapsulación: una propuesta para microencapsular probióticos.», *ARS Pharm.*, vol. 50, n.º 1, pp. 43-50, 2009.
- [110] S. R. White *et al.*, «Autonomic healing of polymer composites», *Nature*, vol. 409, n.º 6822, p. 794, feb. 2001.
- [111] M. M Pelletier, R. Brown, A. Shukla, y A. Bose, *Selfhealing Concrete with a Microencapsulated Healing Agent*. 2011.
- [112] H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, y E. Schlangen, «Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete», *Ecol. Eng.*, vol. 36, n.º 2, pp. 230-235, 2010.
- [113] U. K. Gollapudi, C. L. Knutson, S. S. Bang, y M. R. Islam, «A new method for controlling leaching through permeable channels», *Chemosphere*, vol. 30, n.º 4, pp. 695-705, feb. 1995.
- [114] L. Zhong y M. R. Islam, «A New Microbial Plugging Process and Its Impact on Fracture Remediation», presentado en SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1995.
- [115] «Endospora de Bacterias | Department of Microbiology». [En línea]. Disponible en: <https://micro.cornell.edu/research/epulopiscium/espanol/endospora-de-bacterias>. [Accedido: 31-ene-2018].
- [116] V. Wiktor y H. M. Jonkers, «Bacteria-based concrete: from concept to market», *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, n.º 8, p. 084006, 2016.
- [117] H. M. Jonkers y E. Schlangen, *Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach*, vol. 3. 2007.
- [118] R. Gagné y M. Argouges, «A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements», *Mater. Struct.*, vol. 45, n.º 11, pp. 1625-1638, nov. 2012.

- [119] L. J. Parrott, «Damage caused by carbonation of reinforced concrete», *Mater. Struct.*, vol. 23, n.º 3, pp. 230-234, may 1990.
- [120] H. M. Jonkers y E. Schlangen, «A two component bacteria-based self-healing concrete», 2008.
- [121] V. Achal, A. Mukerjee, y M. Sudhakara Reddy, «Biogenic treatment improves the durability and remediates the cracks of concrete structures», *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 1-5, nov. 2013.
- [122] J. Y. Wang, H. Soens, W. Verstraete, y N. De Belie, «Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores», *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 139-152, feb. 2014.
- [123] J. Y. Wang, D. Snoeck, S. Van Vlierberghe, W. Verstraete, y N. De Belie, «Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 110-119, oct. 2014.
- [124] Y. Ç. Erşan, F. Da Silva, N. Boon, W. Verstraete, y N. De Belie, «Screening of bacteria and concrete compatible protection materials», *Constr. Build. Mater.*, vol. 88, pp. 196-203, jul. 2015.
- [125] M. G. Sierra-Beltran, H. M. Jonkers, y E. Schlangen, «Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair», *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 344-352, sep. 2014.
- [126] J. Y. Wang, N. De Belie, y W. Verstraete, «Diatomaceous earth as a protective vehicle for bacteria applied for self-healing concrete», *J. Ind. Microbiol. Biotechnol. Fairfax*, vol. 39, n.º 4, pp. 567-77, 2012.
- [127] V. Achal, A. Mukerjee, y M. S. Reddy, «Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, n.º 6, pp. 730-734, jun. 2011.
- [128] N. Chahal, R. Siddique, y A. Rajor, «Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, n.º 1, pp. 351-356, mar. 2012.
- [129] G. Fagerlund y M. Hassanzadeh, «Self-healing of cracks in concrete long-term exposed to different types of water : results after 1 year exposure», Lund Institute of Technology, TVBM-3156, 2010.
- [130] J. Wang, K. Van Tittelboom, N. De Belie, y W. Verstraete, «Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, n.º 1, pp. 532-540, ene. 2012.
- [131] S. S. Bang, J. J. Lippert, U. Yerra, S. Mulukutla, y V. Ramakrishnan, «Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation», *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 1, n.º 1, pp. 28-39, feb. 2010.
- [132] E. Tziviloglou, V. a. C. Wiktor, H. M. Jonkers, y E. Schlangen, «Preparation and optimization of bio-based and light weight aggregate-based healing agent for application in concrete», *Proc. 5th Int. Conf. Self-Heal. Mater. ICSHM Durh. USA June 22-24 2015 Ext. Abstr.*, 2015.
- [133] basilisk, «Home», *Basilisk*. .
- [134] basilisk, «Water basin repairs itself due to Self-healing Concrete», *Basilisk*. .
- [135] E. P. Office, «Jonkers». [En línea]. Disponible en: <https://www.epo.org/learning-events/european-inventor/finalists/2015/jonkers.html>. [Accedido: 16-ene-2018].
- [136] 20Minutos, «Un científico egipcio afirma que se usó hormigón en la construcción de las Pirámides», *20minutos.es - Últimas Noticias*. [En línea]. Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/178953/0/hormigon/piramide/estudio/>. [Accedido: 31-ene-2018].
- [137] J. V. Agulló y J. G. Moreno, «Filamentos de carbono en hormigones», *Bol. Grupo Esp. Carbón*, n.º 14, pp. 1-7, 2009.

- [138] C. S. Fernández, «Qué es el Amianto (I) Definición, tipos y riesgos», *Construcción Patología Rehabilitación*, 21-oct-2013. .
- [139] P. Garcés Terradillos, E. M. Zornoza Gómez, L. García Andión, F. J. Baeza De Los Santos, y Ó. Galao Malo, *Hormigones conductores multifuncionales*. Editorial Club Universitario, 2011.
- [140] «Resipod Resistivmetro Resistividad superficial hormigon portatil». [En línea]. Disponible en: <https://www.dagasl.es/hormres7.htm>. [Accedido: 10-feb-2018].
- [141] M. del C. Picos Pérez, «Durabilidad en el hormigón armado : la resistividad eléctrica como indicador de durabilidad», 2014.
- [142] C. Barta, «Fibra de carbono: Información, estructura y propiedades», *CarboSystem*, 15-jun-2017. [En línea]. Disponible en: <http://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>. [Accedido: 03-feb-2018].
- [143] B. Azdrubal y R. Valencia, «Procesado, estructura y propiedades de materiales compuestos de matriz termoplástica y nanorefuerzos de carbono», Universidad del País Vasco, Bilbao, 2011.
- [144] A. Herráez, «Las asombrosas estructuras del carbono: fullerenos, grafenos y nanotubos», *APUNTES DE CIENCIAS*, 2011.
- [145] N. Martín, «Sobre Fullerenos, Nanotubos de Carbono y Grafenos», *Arbor*, vol. 187, n.º Extra\_1, pp. 115-131, ene. 2011.
- [146] «Nanotube & Carbon Fiber Overview», *The World <br />of Nanoscience*. [En línea]. Disponible en: <http://worldofnanoscience.weebly.com/nanotube--carbon-fiber-overview.html>. [Accedido: 24-feb-2018].
- [147] S. Toyokuni, «Genotoxicity and carcinogenicity risk of carbon nanotubes», *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 65, n.º 15, pp. 2098-2110, dic. 2013.
- [148] Ó. Galao, «Matrices cementicias multifuncionales mediante adición de nanofibras de carbono», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universitat d'Alacant - Universidad de Alicante, 2012.
- [149] F. Collins, J. Lambert, y W. H. Duan, «The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–OPC paste mixtures», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, n.º 2, pp. 201-207, feb. 2012.
- [150] G. Y. Li, P. M. Wang, y X. Zhao, «Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes», *Carbon*, vol. 43, n.º 6, pp. 1239-1245, may 2005.
- [151] X. Fu y D. D. L. Chung, «Submicron-diameter-carbon-filament cement-matrix composites», *Carbon*, vol. 36, n.º 4, pp. 459-462, ene. 1998.
- [152] A. Sassani, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, A. Arabzadeh, y P. C. Taylor, «Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 168-181, oct. 2017.
- [153] A. Lübeck, A. L. G. Gastaldini, D. S. Barin, y H. C. Siqueira, «Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, n.º 3, pp. 392-399, mar. 2012.
- [154] J.-M. Chiou, Q. Zheng, y D. D. L. Chung, «Electromagnetic interference shielding by carbon fibre reinforced cement», *Composites*, vol. 20, n.º 4, pp. 379-381, jul. 1989.
- [155] S. Wen y D. D. L. Chung, «Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement», *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n.º 2, pp. 329-332, feb. 2004.

- [156] A. P. Singh *et al.*, «Multiwalled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties», *Carbon*, vol. 56, pp. 86-96, may 2013.
- [157] A. M. González Sersen, «Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro», Universidad de Chile, 2011.
- [158] R. B. Polder, «Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation», *Constr. Build. Mater.*, vol. 15, n.º 2, pp. 125-131, mar. 2001.
- [159] W. Morris, A. Vico, M. Vazquez, y S. R. de Sanchez, «Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements», *Corros. Sci.*, vol. 44, n.º 1, pp. 81-99, ene. 2002.
- [160] P. Garcés, J. Fraile, E. Vilaplana-Ortego, D. Cazorla-Amorós, E. G. Alcocel, y L. G. Andión, «Effect of carbon fibres on the mechanical properties and corrosion levels of reinforced portland cement mortars», *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, n.º 2, pp. 324-331, feb. 2005.
- [161] P. Azarsa y R. Gupta, «Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review», *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, pp. 1-30, ene. 2017.
- [162] C. Andrade y C. Alonso, «Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method», *Mater. Struct.*, vol. 37, n.º 9, pp. 623-643, nov. 2004.
- [163] S.-N. Lu, N. Xie, L.-C. Feng, y J. Zhong, «Applications of Nanostructured Carbon Materials in Constructions: The State of the Art», *J. Nanomater.*, 2015.
- [164] H. Li, Q. Zhang, y H. Xiao, «Self-deicing road system with a CNFP high-efficiency thermal source and MWCNT/cement-based high-thermal conductive composites», *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 86, pp. 22-35, feb. 2013.
- [165] Z. Tang, Z. Li, J. Qian, y K. Wang, «Experimental study on deicing performance of carbon fiber reinforced conductive concrete», *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 113-117, ene. 2005.







Universidad de Cantabria