



Departament de Projectes
d'Enginyeria

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ESEIAAT

Titulació: Grado en Ingeniería en Vehículos Aeroespaciales.

Alumno: Daniel Samartino Rodríguez

Director del TFG: Lluís Gil Espert

Codirector: Ernest Bernat Masó

Contenido de este volumen:

Estudio de Mercado de sensores de temperatura y humedad alimentados inalámbricamente para la monitorización de la resistencia del hormigón

Índice

1	Introducción	7
1.1	Objetivo del proyecto	7
1.2	Alcance del proyecto	8
1.3	Requisitos	10
1.4	Justificación	11
1.5	Planificación.....	12
2	Marco Legal.....	13
2.1	ASTM C39	15
2.1.1	Alcance y referencias de la norma	15
2.1.2	Resumen y uso	17
2.1.3	Sobre la máquina de ensayo	18
2.1.4	Sobre las muestras a ensayar	21
2.1.5	Procedimiento	22
2.2	ASTM C1074	24
2.2.1	Terminología.....	26
2.2.2	Practica y uso.....	28
2.2.3	Función de madurez.....	29

2.2.4	Material necesario y obtención de las funciones	32
2.2.5	Procedimiento para estimar la resistencia in-situ	35
2.2.6	Obtención de constantes	37
3	Estado del Arte.....	40
3.1	Ensayos del hormigón fresco.....	42
3.1.1	El cono de Abrams.....	43
3.1.2	Mesa de sacudidas	46
3.1.3	Ensayo mediante consistómetro Vebe	50
3.1.4	Otros ensayos.....	55
3.2	Ensayos del hormigón endurecido	56
3.2.1	Razones para la extracción de probetas testigo	57
3.2.2	Planificación y trabajo preliminar	59
3.2.3	Tamaño, número de muestras, localización y procedimientos de extracción	60
3.2.4	Localización y extracción de los testigos.....	62
3.2.5	Acondicionamiento de los testigos, medida de la densidad y del exceso de poros	65
3.2.6	Interpretación de los resultados de resistencia de los testigos..	69
3.3	Costes de los ensayos usados actualmente	74

3.4	Conclusiones.....	80
4	Tecnologías similares existentes.....	82
4.1	Giatec Scientific Inc.	83
4.1.1	SmartRock 2.....	85
4.1.2	Especificaciones técnicas	88
4.1.3	Caso real: DIVCON Inc.	91
4.1.4	Caso real: Girlchrist Construction Company	93
4.1.5	Conclusiones.....	95
4.2	Wake Inc.	98
4.2.1	HardTrack Cloud Sensor	99
4.2.2	HardTrack Mobile.....	101
4.2.3	Caso real: Shimmick Construction.....	103
4.2.4	Conclusiones.....	105
5	Estimación del coste de la tecnología “Sensocrete”	107
5.1	Justificación	108
5.2	Definición del producto.....	117
6	Análisis de mercado	120
6.1	Estrategia.....	122

6.2	Información macroeconómica	123
6.3	Análisis DAFO.....	130
6.3.1	Análisis interno.....	132
6.3.2	Análisis externo	134
6.3.3	Matriz DAFO	136
7	Estrategia de futuro: CAMO (Corregir – Afrontar – Mantener – Explorar) 137	
7.1	Corregir las debilidades	138
7.2	Afrontar las amenazas.....	139
7.3	Mantener las fortalezas.....	140
7.4	Explorar las oportunidades	141
7.5	Estrategia.....	142
8	Conclusiones generales.....	144
9	Tabla de ilustraciones.....	147
10	Bibliografía	151

1 Introducción

1.1 Objetivo del proyecto

Partiendo de la hipótesis de que el Sensocrete está desarrollado e implementado, y a efectos de extraer conclusiones para decidir finalmente si es interesante inicial su desarrollo, el objetivo principal de este proyecto consiste en hacer un estudio de mercado de esta tecnología basándonos en los siguientes factores:

- Sectores de mercado.
- Oferta/demanda.
- Rango de aplicación.
- Precio de venta.

Destacamos que el sensor en cuestión será únicamente de temperatura, se descarta la posibilidad de medir también la humedad pues no es necesario para la aplicación deseada y complica la tecnología, aumentando el consumo y precio del sensor de forma innecesaria.

1.2 Alcance del proyecto

El proyecto constará de las siguientes partes:

- **Marco legal:** se analizará la normativa relacionada con los ensayos relacionados con el fraguado del hormigón en obras civiles.
- **Estado del arte:** se estudiarán las soluciones utilizadas actualmente, para poder ver en que se puede mejorar y optimizar.
- **Información:** Obtener datos sobre los costes que conllevan los métodos actuales, utilizando métodos tales como: encuestas a empresas del sector, análisis de proyectos públicos/privados a los que se tenga acceso, etc....
- **Análisis de tecnologías similares existentes actualmente en el mercado:** hay soluciones similares al Sensocrete. Sin embargo, parece que no encuentran su sitio en el mercado. Analizar porqué (el Sensocrete parte de unos sensores completamente inalámbricos, sin embargo, las soluciones existentes parten de una alimentación por cable a los sensores, con la complicación que conlleva a la hora de instalarlos)
- **Definición del Sensocrete:** se definirá la tecnología, analizando sus ventajas y desventajas respecto a los métodos de ensayo utilizados actualmente.
- **Costes:** Estimar el precio de esta tecnología, y compararla con los costes actuales del mercado.
- **Análisis de posibles mercados (oferta/demanda):** en función de las conclusiones sacadas en los apartados anteriores, se buscarán posibles

mercados en los que implementar esta tecnología, analizando si son viables o no.

1.3 Requisitos

Como todo estudio de mercado, su análisis ha de cumplir una serie de requisitos:

- Se ha de realizar una extensa recopilación de información fiable, y especificando claramente sus fuentes de procedencia.
- Debe incorporar conclusiones sacadas de la observación directa del mercado: es decir, se ha de observar cómo funciona actualmente el mercado en el que la tecnología a desarrollar sería implementada.
- Se ha de analizar e investigar a fondo la competencia que tendría el producto.
- Ha de quedar claro un cliente objetivo para el producto.
- Se ha de hacer también un “SWOT análisis”, analizando ventajas, desventajas, oportunidades y amenazas para el producto.
- Finalmente se ha de estimar el coste del producto y definir de forma clara el mercado y los clientes objetivos que hacen viable dicho producto.

1.4 Justificación

Actualmente el control de la evolución del fraguado y la resistencia del hormigón una vez colocado, se hace a través de ensayos a compresión de muestras que se han dejado curar durante un número determinado de días. Esto conlleva tener que sacar muestras o producir probetas del hormigón que se tiene que normalizar, llevarlas hacia el laboratorio donde se producirán los ensayos, y esperar a que estos sean efectivos. Todo este proceso conlleva unos gastos económicos y medioambientales notablemente mejorables.

El Sensocrete es un sistema de medición in-situ mediante una serie de sensores alimentados y comunicados de forma inalámbrica, y una antena, que permite no solo ahorrar los costes de desplazamiento, producción y ensayo de las probetas o muestras, sino que además permite obtener unos resultados en tiempo real, pues el número de muestras o probetas es finito. Sin embargo, con el Sensocrete se pueden obtener resultados tantas veces como se desee.

Por tanto, un estudio de mercado del sector nos permitirá determinar si es viable la comercialización o no de esta tecnología.

1.5 Planificación

A continuación, se muestra una lista de tareas que se llevarán a cabo durante la realización de este proyecto, junto con una breve descripción de las mismas:

- Project chárter
- Estado del arte: estudio de las soluciones utilizadas actualmente.
- Análisis de costes de ensayos: analizar los costes de los métodos utilizados actualmente.
- Tecnologías similares existentes: buscar en el mercado tecnologías similares al Sensocrete, y ver porqué son o no viables, y destacar qué ventajas adicionales ofrece el Sensocrete respecto a las tecnologías ya existentes.
- Estimar el precio que tendría el Sensocrete: Valorar el coste que tendría la implementación y comercialización de esta tecnología.
- Mercados potenciales, análisis de mercado: buscar mercados potenciales para esta tecnología y sacar conclusiones. Como tareas significativas de esta parte del proyecto hay que destacar un análisis SWOT (Strenghts, Weaknesses, Opportunities y Threats) que ayude a definir el estudio de mercado.
- Conclusiones: a partir de todos los trabajos realizados, extraer conclusiones sobre la viabilidad del producto a implementar.

2 Marco Legal

El primer paso para iniciar este proyecto consistirá en analizar a fondo todas las regulaciones legales que establecen cómo se hacen los ensayos con el método destructivo y el método no destructivo in situ. Esto nos ayudará a:

- Saber qué leyes/regulaciones tendrá que cumplir el producto en sí.
- Analizar en profundidad las ventajas y desventajas que tiene un método respecto al otro.
- Analizar mejor los costes de ambos métodos.
- Obtener conclusiones para determinar si el proyecto es viable o no.

Dividiremos este apartado en dos subapartados:

1. ASTM C39: "*Standard Test Método for Compressive Strenght of Cylindrical Concrete Specimens*": esta norma regula cómo se ha de realizar el ensayo a compresión (ensayo destructivo).
2. ASTM C1074: "*Standard Practice for Estimating Concrete Strenght by the Maturity Method*": esta norma regula el método de madurez, que el utilizado por la tecnología que se analiza.

Esto nos ayudará a entender el contexto de los métodos más utilizados actualmente (regulados por la ASTM C39), y las ventajas de los métodos no

destruictivos más avanzados que aún no se utilizan de forma tan asidua (regulados por la ASTM C1074).

2.1 ASTM C39

2.1.1 Alcance y referencias de la norma

Esta norma nos regula cómo se ha de hacer el ensayo destructivo de las probetas de hormigón que se han extraído de la obra. Utiliza otras normas ASTM que no se analizarán como referencia:

- C31/C31M: *“Practice for Making and Curing Concrete Test Specimen in the Field”*.
- C42/C42M: *“Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete”*.
- C192/C192M: *“Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”*.
- C617: *“Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens”*.
- C670: *“Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials”*.
- C873: *“Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds”*.
- C1077: *“Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation”*.
- C1231/C1231M: *“Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders”*.
- E4: *“Practices for Force Verification of Testing Machines”*.

- E74: *“Practice for Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines.”*

2.1.2 Resumen y uso

En resumen, el ensayo del método destructivo consiste en ir aplicando de forma axial una carga de compresión a un cilindro de hormigón, aumentándola a un ritmo concreto hasta que se produce el fallo de la probeta. La carga se calcula dividiendo la máxima fuerza que ha soportado la probeta por la sección de esta:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi d^2}$$

Este ensayo se usará como indicativo de si la fórmula que se está utilizando (moldeo, mezclado, curado, temperatura, humedad, etc.) es la adecuada para la obra a analizar. Aquí ya vemos una primera desventaja, pues hay muchos factores externos que pueden cumplirse en el ensayo, donde todo está controlado, pero no en el lugar de aplicación final del hormigonado.

2.1.3 Sobre la máquina de ensayo

La máquina de laboratorio utilizada para aplicar las cargas en la probeta ha de cumplir ciertas características:

- Ha de estar calibrada correctamente, recalibrándola siempre:
 - Al menos cada 13 meses.
 - En el momento de instalarse o cuando se mueva de su ubicación.
 - Después de manipularla/repararla.
 - A la mínima sospecha de que esta está fallando.
- El diseño deberá incluir las siguientes características:
 - La máquina deberá ser operada con algún tipo de energía que no sea manual, y deberá aplicar la carga de forma continua, no intermitente.
 - El espacio para las probetas deberá ser lo suficientemente grande como para acomodar, de forma que sea fácilmente visible, un indicador elástico con suficiente capacidad para cubrir todo el rango de cargas que aplique la máquina.
- La precisión de dicha máquina:
 - Deberá tener un error inferior a $\pm 1\%$.
 - Se deberá verificar la precisión de la máquina haciendo 5 ensayos seguidos en cuatro incrementos que deberán ser lo más semejantes posibles. La diferencia entre dos ensayos sucesivos no deberá exceder

un tercio de la diferencia entre al máximo y el mínimo de estas pruebas.

- Se deberá registrar el error absoluto y el relativo en cada uno de los ensayos (de la carga que indica la máquina y la registrada por el aparato de medición).
- El informe de verificación de la máquina deberá indicar en qué rango de carga se comprobó que se cumplían los requisitos. El rango en que se usa la máquina no podrá estar fuera del rango de cargas aplicadas durante la prueba de precisión.

La máquina de ensayo deberá estar equipada con dos soportes/cojinetes de hierro con acabado endurecido:

- El superior deberá tener la forma que se puede verse en la figura, un bloque asentado esféricamente que reposará encima de la probeta, el cual deberá cumplir los requisitos dimensionales indicados en la figura.
- El inferior deberá ser un bloque sólido donde la probeta apoye sin problemas.

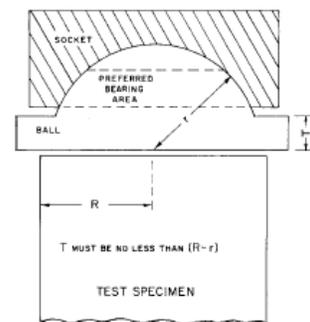


Ilustración 2-1 Esquema soporte superior

La superficie de ambos deberá ser paralela, y la probeta siempre deberá estar centrada respecto a la junta esférica del soporte superior. Además, ambos deberán

tener unos grosores mínimos/máximos y, en el caso del superior, unos diámetros concretos en relación con el de la probeta que están definidos en la norma.

2.1.4 Sobre las muestras a ensayar

La norma nos indica también una serie de características a cumplir por las probetas/muestras que se extraen para ser analizadas:

- Estas no se podrán considerar válidas para el ensayo si alguno de los diámetros difiere de cualquier otro en más de un 2%.
- Antes de proceder al ensayo, ninguna de las superficies de los testigos de hormigón deberá diferir en más de 0,5 grados de perpendicularidad en relación con el eje de las mismas. Para determinar el diámetro de éstos, se hará la media entre dos diámetros medidos a media altura y de forma perpendicular entre ellos.

2.1.5 Procedimiento

Los testigos que se hayan de curar en ambiente húmedo deberán ser ensayados lo más rápido posible una vez retirados de éste, manteniéndose con la humedad adecuada durante todo el tiempo que transcurre desde que se retiran del lugar de curado hasta que se ensayan.

Los tiempos de curado para los ensayos deberán cumplir las siguientes tolerancias:

Tiempo de curado	Tolerancia permitida
24 horas	$\pm 0,5h$ o 2,1%
3 días	2h o 2,8%
7 días	6h o 3,6%
28 días	20h o 3%
90 días	2 días o 2,2%

En el momento de situar el testigo en la máquina de ensayo, se deberán limpiar bien las superficies de contacto tanto de la muestra como del soporte

semiesférico. Antes de iniciar el ensayo, se deberá verificar que el indicador de carga esta justo a 0, ajustándolo en caso de que no lo esté, y se deberá ajustar a mano el soporte semiesférico de forma que quede paralelo a la cara superior del testigo.

A lo largo del ensayo, y antes de llegar al 10% de la carga estimada que puede soportar la probeta, se deberá comprobar que el eje vertical del cilindro no se desalinea de la vertical más de medio grado. En caso de que no cumpla este requisito, se deberá descargar el testigo, recentrarlo y repetir el ensayo asegurándose de que cumpla dicho requisito.

La carga se deberá aplicar de forma continua y en incrementos de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, pudiendo ser superior a esta en la primera mitad de la carga estimada que aguanta el testigo. Cuando nos acercamos al fallo del material, la ratio de aplicación de la carga no se deberá alterar, y se deberá mantener hasta que el indicador de carga decrezca de forma notable y se aprecie un patrón de fractura bien definido. Nunca se deberá dejar de aplicar presión en el testigo mientras la carga que está soportando no sea inferior al 95% de la máxima que ha aguantado a lo largo del ensayo.

2.2 ASTM C1074

Esta norma nos regula como se han de hacer los ensayos no destructivos in situ, por tanto, es la norma que nos indica cómo ha de funcionar el producto que estudiamos y toda su competencia. Utiliza otras normas ASTM que no se analizarán como referencia:

- C39: *“Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”*.
- C 109/C 109M: *“Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens)”*.
- C 192/C 192M: *“Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory”*.
- C 403/C 403M: *“Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”*.
- C 511: *“Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes”*.
- C 684: *“Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing of Concrete Compression Test Specimens”*.
- C 803/ C803M: *“Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete”*.
- C 873: *“Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds”*.

- C 900: *“Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete”*.
- C 918: *“Test Method for Measuring Early-Age Compressive Strength and Projecting Later-Age Strength”*.
- C 1150: *“Test Method for the Break-Off Number of Concrete”*.

2.2.1 Terminología

Es importante definir de forma clara una serie de conceptos para poder describir la norma de forma rigurosa y adecuada:

- *Temperatura de referencia (T_0)*: temperatura extraída del hormigón a analizar para calcular el factor temperatura-tiempo de acuerdo con la siguiente ecuación: $M(t) = \sum(T_a - T_0)\Delta t$, donde $M(t)$ define el factor temperatura-tiempo en el tiempo t , siendo este días u horas, Δt define el intervalo de tiempo, en días u horas también, y T_a define la temperatura media del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt . Estas se miden en °C.
- *Tiempo equivalente*: el número de días u horas a una temperatura necesarios para producir una madurez igual a la madurez alcanzada durante un período a temperaturas distintas a esta temperatura.
- *Función de madurez*: expresión matemática que utiliza el historial de temperatura durante un período de curado para calcular un índice que es indicativo de la madurez al final de este.
- *Índice de madurez*: indicador de madurez que se calcula a partir del historial de temperaturas.
- *Método de madurez*: método para estimar la resistencia del hormigón que asume que distintas muestras de un mismo origen tienen la misma resistencia a mismos índices de madurez.

- *Relación madurez-resistencia*: relación obtenida empíricamente que relaciona la resistencia a la compresión y el índice de madurez.
- *Factor Temperatura-tiempo*: el que se obtiene a partir de la función de madurez.

2.2.2 Practica y uso

Para obtener la relación temperatura-tiempo se deben realizar una serie de ensayos en laboratorio según la mezcla de hormigón utilizada. Por tanto, para cada tipo de hormigón se deberán realizar ensayos que corroboren que la función resistencia-madurez que se utilizará en este tipo de productos es la adecuada.

Es importante tener en cuenta una serie de limitaciones que tiene este método:

- Como se ha dicho previamente, los resultados obtenidos vendrán condicionados por la exactitud con que se haya obtenido la función madurez-temperatura.
- Este método deberá, en la mayoría de los casos, ser suplementado por otras formas de indicar la resistencia potencial de la mezcla de hormigón utilizada.
- No se tienen en cuenta oscilaciones muy grandes en la temperatura para los instantes próximos en la línea temporal al vertido del hormigón.
- El hormigón se deberá mantener en condiciones que permitan mantener la humedad en condiciones favorables.

2.2.3 Función de madurez

Hay dos funciones a tener en cuenta para obtener el índice de madurez a partir del histórico de temperaturas de la estructura:

- La primera es utilizada para obtener el factor madurez-tiempo:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t$$

Donde:

- $M(t)$ es el factor temperatura-tiempo transcurrido el tiempo t (ya sean días u horas).
- Δt es el tiempo transcurrido (días u horas).
- T_a es la temperatura media del hormigón (en °C) durante el intervalo Δt .
- T_0 es la temperatura de referencia.

Por tanto, con esta función eliminamos por ejemplo el hecho de que una misma estructura de hormigón en un clima frío o cálido no maduraría de la misma forma.

- La segunda se utiliza para calcular el tiempo equivalente a una temperatura dada:

$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right)} \Delta t$$

Donde:

- t_e es el tiempo equivalente a una temperatura específica T_s , que puede venir dada en días u horas.
- Q es la energía de activación dividida por la constante universal de los gases R .
- T_a es la temperatura absoluta media del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt (en K).
- T_s es la temperatura especificada (también en K).
- Δt es el intervalo de tiempo (ya sea en días u horas, correspondiente con t_e).

El cálculo de los valores aproximados de la temperatura de referencia (T_0) y la energía de activación dividida por la constante universal de los gases R (Q), será explicado de forma detallada más adelante.

La utilidad de estas funciones se resume en el concepto descrito por Barbosa en 2005:

“Una misma muestra de concreto con exactamente el mismo grado de madurez – medido como una función de temperatura y del tiempo – tiene, aproximadamente, la misma resistencia que cualquiera de las combinaciones de temperatura y tiempo para alcanzar el factor de madurez”.

Que fue posteriormente ampliado por Peres en 2007, relacionando la madurez con el grado relativo de desarrollo de la resistencia:

“Una misma mezcla de concreto con exactamente el mismo grado de madurez (medido como una función de temperatura y del tiempo) tiene, aproximadamente, la misma resistencia relativa que cualquiera de las combinaciones de temperatura y tiempo para alcanzar el factor de madurez”.

2.2.4 Material necesario y obtención de las funciones

Para poder aplicar lo establecido por la norma, se necesitan sensores de temperatura que registren tiempo y temperatura. Para que dichos sensores cumplan la norma se deben utilizar:

- Termopares o termistores con una precisión de 1 ° C.
- El método de registro se deberá hacer con un intervalo de media hora o menos durante las primeras 48 horas, y de 1 hora o menos una vez transcurrido este tiempo.

Para obtener la relación de resistencia-madurez para una mezcla dada se debe:

1. Preparar al menos 15 probetas según las especificaciones de la norma ASTM C 192/C 192M. Estas deberán tener unas proporciones de mezcla lo más similares posible a aquellas que tendrá el hormigón cuya resistencia queremos estimar.
2. Se deberán situar los sensores de temperatura lo más centrados (con un margen de 15 milímetros) posibles en el interior de las probetas, tanto en el eje longitudinal como el radial.
3. Curar las probetas en curado termal o en cámara húmeda según lo especificado en la norma ASTM C 511.

4. Proceder a hacer los ensayos de compresión a 1, 3, 7 14 y 28 días según se especifica en la norma ASTM C39 (punto 2.1.1 de este documento). Se deberán ensayar 2 probetas para cada intervalo de tiempo, si la diferencia de resistencia entre ambas excede del 10%, se deberá probar una tercera probeta y registrar la resistencia media de las tres.
5. Para cada ensayo a un tiempo dado, se deberá registrar también el índice de madurez de los especímenes ensayados, ya sea mediante el uso de las ecuaciones definidas previamente o por los valores dados por el sensor utilizado.
6. Mediante una regresión, tan compleja como sea necesario para ajustarse lo máximo posible a los valores registrados, se obtiene una curva que relacione la resistencia con la madurez (en las ilustraciones 2-1 y 2-2 tenemos curvas de ejemplo a partir de los registros obtenidos).

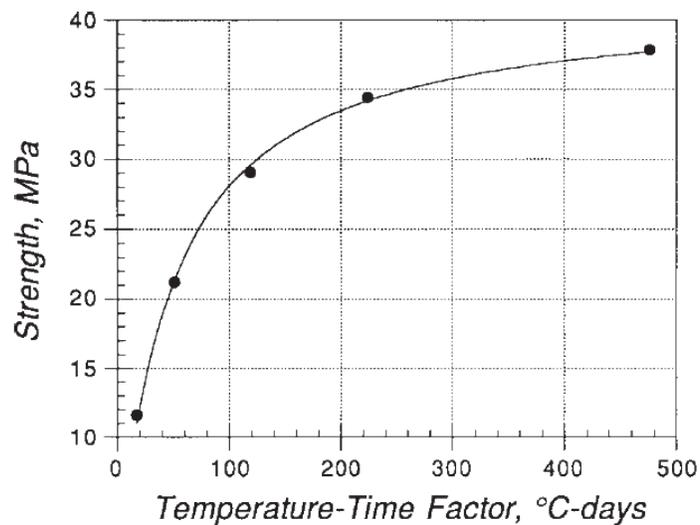


Ilustración 2-2 Ejemplo de relación entre resistencia y factor temperatura tiempo

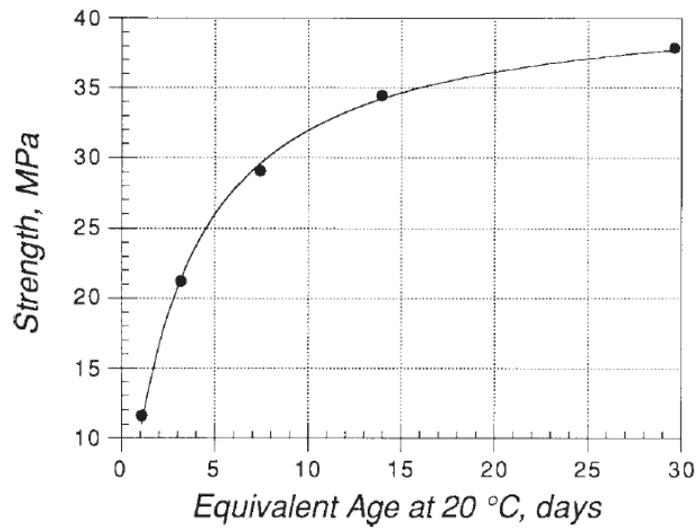


Ilustración 2-3 Ejemplo de relación entre resistencia i temperatura equivalente a 20 °C

2.2.5 Procedimiento para estimar la resistencia in-situ

Esta norma define también como se deberán utilizar los sensores para obtener la resistencia del hormigón:

1. Los sensores deberán ser situados en la estructura tan pronto como el hormigón lo permita, colocándolos en lugares críticos tanto a nivel de requisitos estructurales como de exposición a corrosión, altas temperaturas, u otros factores que afecten de forma negativa a la resistencia de este. También deberán ser puestos en marcha de la forma más temprana que lo permita la situación.
2. Cuando se necesite conocer la resistencia de una zona concreta, se deberá leer la temperatura del sensor o bien la madurez y, mediante las curvas obtenidas según el apartado 2.1.2.4, evaluar la resistencia correspondiente.
3. En caso de que alguna lectura nos haga sospechar que la zona no está cumpliendo los requisitos establecidos y, previo a realizar acciones críticas tales como retirada de material para volver a hacer el vertido, se aconseja complementar el método de la madurez con otras técnicas:
 - a. Ensayos in-situ tales como los explicados en las normas ASTM C 803/C 803M, C 873, C 900 o C 1150.
 - b. Ensayos en probetas obtenidas de la mezcla de hormigón utilizada, según ASTM C 918 o C 684.

Por último, hacer hincapié en que la norma no determina una precisión concreta que deberán tener los resultados, pues la exactitud de la resistencia del hormigón evaluado dependerá de muchos factores, tales como la exactitud de la curva de madurez utilizada, la consistencia de la mezcla del hormigón en distintos vertidos, o el historial de temperatura poco después del vertido.

2.2.6 Obtención de constantes

Para obtener la energía de activación y/o la temperatura de referencia se utilizan probetas de hormigón. El objetivo de este proceso es establecer la relación entre resistencia y edad de madurez para especímenes curados en húmedo a tres distintas temperaturas (debiendo la mínima y la máxima coincidir con las previstas en el lugar de aplicación, y la media con el valor medio entre estas dos). Como es de esperar estas probetas deberán tener una composición lo más fiel posible a la estructura para el análisis de la cual se requieren dichas constantes.

Se deben realizar los ensayos siguiendo lo indicado en la norma ASTM C109/C109 M con probetas cúbicas, hasta llegar a un tiempo que sea aproximadamente el doble de la final. Si el tiempo final no está claro, se empezará con un primer ensayo en el que la resistencia sea de aproximadamente 4 MPa, y se harán ensayos consecutivos en tres cubos que vayan doblando la edad de este. Por ejemplo, si el primero se hizo a las 12 horas, los siguientes deberán hacerse a 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días.

Los datos de resistencia en función de la temperatura obtenidos según este ensayo deberán ser representados en un gráfico de la siguiente forma: en el eje

vertical deberá indicarse el inverso de la resistencia, y en el horizontal el inverso de la edad de la probeta menos el tiempo de fraguado. Mediante regresión lineal se obtiene la pendiente de la recta para cada una de las distintas temperaturas

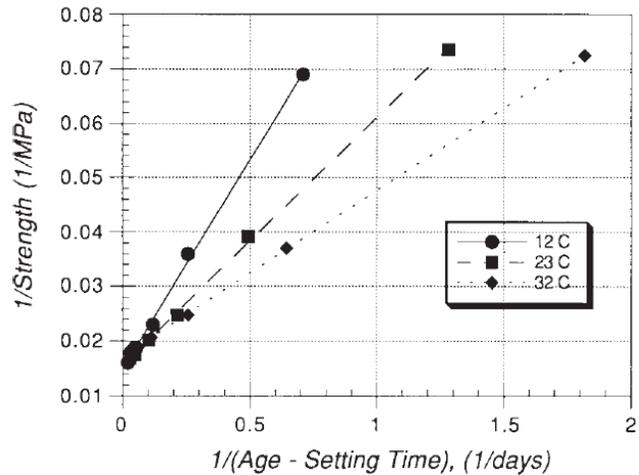


Ilustración 2-4 Inverso de la resistencia vs. inverso de la edad menos el tiempo de fraguado.

de curado, a este valor le llamaremos k (en la ilustración 2-3 podemos ver un ejemplo).

Hay otros métodos que permiten obtener el valor de k si no se conocen los tiempos de fraguado, que no se analizarán con detalle.

El siguiente paso para llegar a obtener la temperatura de referencia es graficar los valores de K en función de las temperaturas de curado, la pendiente de esta recta es la temperatura de referencia (ilustración 2-4), utilizada para el cálculo de la madurez.

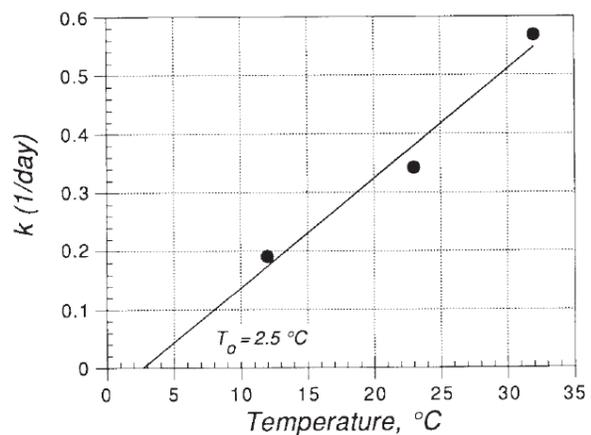


Ilustración 2-5 Constante K vs. Temperatura de curado

Para obtener la energía de activación, se deben calcular los logaritmos naturales de K, y representarlos como función de la temperatura de curado (en

Kelvin). La pendiente de la recta obtenida en negativo representa la energía de activación dividida por la constante de los gases Q , utilizada para el cálculo del tiempo equivalente.

3 Estado del Arte

En este apartado analizaremos los métodos utilizados actualmente para ensayar el hormigón en obras. Tal y como se ha explicado previamente, existen **ensayos destructivos**, donde las probetas o muestras se destruyen, y **ensayos no destructivos**, donde no se altera ni destruye la estructura. En este apartado del estudio nos centraremos en los **ensayos destructivos**.

Primeramente, hay que distinguir entre dos tipos de ensayo según la forma en la que se analiza:

- **Ensayos del hormigón fresco:** se realizan con el hormigón recién vertido y durante su fraguado, sirven para conocer sus características.
- **Ensayos del hormigón endurecido:** se realizan con el hormigón ya endurecido y sirven para determinar su resistencia y propiedades.

También hay que distinguir los ensayos según su finalidad:

- **Ensayos previos:** todos aquellos ensayos que se realizan antes de iniciar las obras, los cuales nos ayudarán a determinar la dosificación y el cómo se llevará y verterá el hormigón en las obras.
- **Ensayos característicos:** se realizarán para comprobar si la resistencia y otras características del material a utilizar están dentro de los límites del proyecto.

- **Ensayos de control:** se realizan en la obra, mediante probetas u otros métodos para comprobar si las características del hormigón que se está utilizando (resistencia, consistencia, etc.) están dentro de los límites del proyecto.
- **Ensayos de información:** se realizan una vez finalizada la obra y a distintos intervalos de tiempo, para comprobar la resistencia del material en los diferentes intervalos.

3.1 Ensayos del hormigón fresco

A la hora de tomar muestras para ensayos del hormigón fresco, estas deben ser representativas y deben tener un volumen de entre 1,25 y 1,5 veces el volumen que tendrán las probetas. Cuando las muestras se tomen del camión hormigonera, hay que controlar de forma muy cuidadosa la segregación y tomar una muestra uniforme del contenido; para comprobar que la mezcla para el vertido es homogénea, se toman muestras a un 25% y 75% de la descarga para diferentes ensayos. En caso de que no sea posible tomar muestras durante la descarga, se eligen cinco porciones aleatorias de toda la descarga sin que estas se hayan tomado de los bordes, ya que en estos puede producirse segregación. En cualquier caso, las muestras para ensayos de hormigón fresco deben protegerse del sol, lluvia y otras inclemencias meteorológicas y no se deben dejar pasar más de 15 minutos antes de su utilización.

A continuación, se explicará de forma detallada los distintos tipos de **ensayos de hormigón fresco**:

3.1.1 El cono de Abrams

Todo este ensayo se realiza siguiendo la normativa EHE-08, publicada en 2008 en el real decreto 1247/2008.

El cono de Abrams es un molde de metal con forma de cono truncado, que se utiliza para ensayos de consistencia de hormigón fresco. Tiene unas medidas normalizadas: un diámetro en la base de 20 centímetros, superior de 10 centímetros con una altura de 30 centímetros.

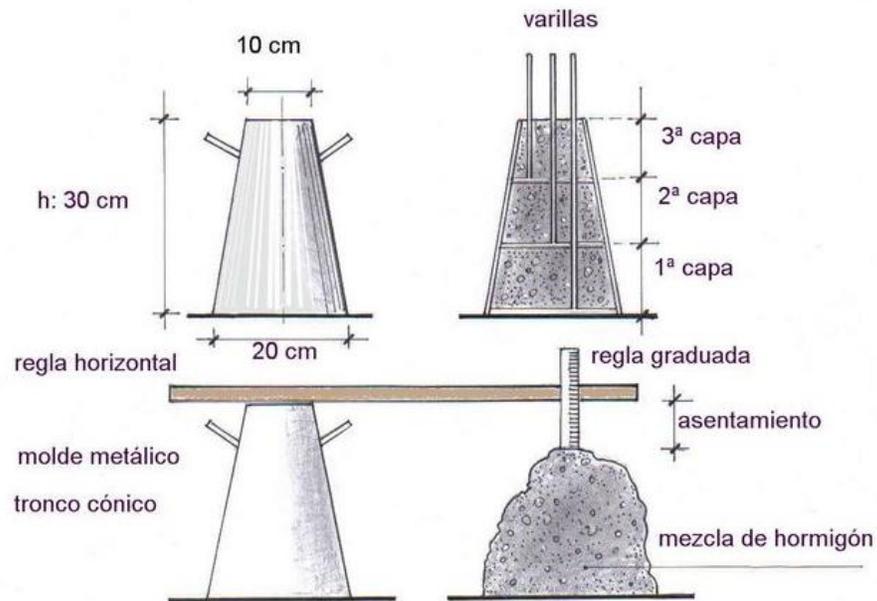


Ilustración 3-1 Cono de Abrams

La cantidad mínima necesaria para el proceso de llenado del molde será de 8 litros de hormigón. Primero se debe colocar el molde sobre una plancha de apoyo horizontal, ambos humedecidos con agua (ni grasa, ni aceite, ni otros lubricantes), y el operario se deberá situar sobre las posaderas de éste para evitar que se mueva.

Seguidamente se procederá a un llenado en tres capas, apisonando cada una de ellas con 25 golpes de varilla distribuida de forma uniforme. Estas 3 capas de llenado deberán ser lo más cercanas posibles a $1/3$, $2/3$, y el total del volumen total del molde (es importante recalcar que se debe dividir el molde según volumen, no según altura). Una vez finalizado el proceso de llenado, se enrasa la superficie del molde haciendo rotar la varilla sobre ésta, siempre sin dejar de pisar el molde con las posaderas y eliminando el sobrante de hormigón.

A continuación, se procede a levantar el molde. Dicho levantamiento debe durar entre 3 y 7 segundos. Una vez se ha levantado, se mide cuánto ha descendido la mezcla en el punto central y de forma totalmente vertical: a este valor se le denomina asentamiento, y puede variar entre 2 y 18 cm.

En la siguiente tabla podemos encontrar la relación entre la consistencia del hormigón y el asentamiento producido al levantar el molde:

Asentamiento (cms.)	Consistencia
0-2	Seca
3-5	Plástica
6-9	Blanda

10-15	Fluida
16-20	Líquida

Por último, es importante especificar que, si el cono se desmorona, se inclina decididamente hacia un lado, o sufre algún corte o segregación, el ensayo no será válido y deberá repetirse.

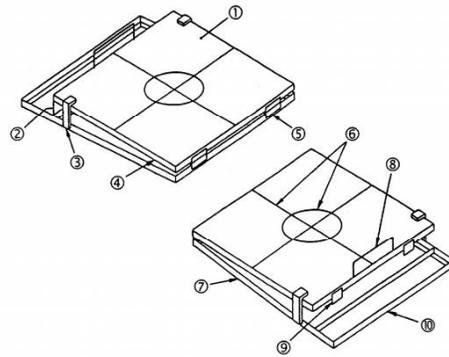
Normalmente se considerará fallido el ensayo con resultados de tipo seco, plástico o líquido.

3.1.2 Mesa de sacudidas

Este ensayo también se conoce comúnmente como ensayo de escurrimiento del hormigón. Se basa en la norma UNE EN 12350-5. En este ensayo se mide la consistencia del hormigón fresco midiendo su esparcimiento sobre un plato sometido a sacudidas.

Para la realización del ensayo se necesitarán los siguientes aparatos:

- La **mesa de sacudidas**:
compuesta por una parte móvil (superficie metálica plana cuadrada de 700 ± 2 mm de costado) y una fija. La parte móvil deberá poder caer sobre la fija desde una altura determinada y además deberá tener una masa de $16 \pm 0,5$ kg. Por último, la altura de caída de la parte superior debe limitarse a 40 ± 1 mm.



- Leyenda
- ① Plato metálico
 - ② Movimiento limitado a 40 ± 1
 - ③ Tope superior
 - ④ Tapa o parte superior de la mesa
 - ⑤ Bisagras exteriores
 - ⑥ Marcas
 - ⑦ Marco de la base
 - ⑧ Asa para levantar
 - ⑨ Tope inferior
 - ⑩ Tabla de pie

Ilustración 3-2 Mesa de sacudidas

- Un **molde** para formar la probeta del ensayo. El interior debe ser completamente liso y ha de ser cónico respetando las siguientes medidas: el diámetro de la base ha de ser de 200 ± 2 mm; el de la

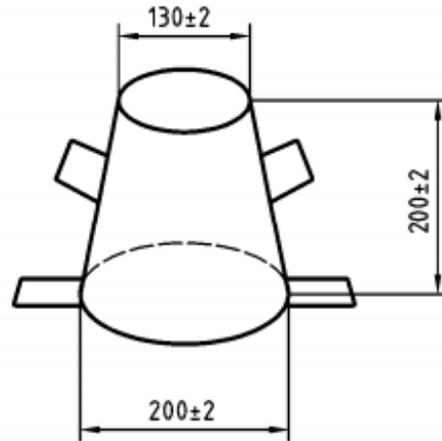


Ilustración 3-3 Molde para mesa de sacudidas

- parte superior de 130 ± 2 mm, y una altura de 200 ± 2 mm.

- Una **maza de apisonar**, que deberá tener una sección cuadrada de 40 ± 1 mm de lado y una longitud de 200 mm aproximadamente. Se le podrá añadir una longitud adicional de 120 a 150 mm de sección circular para facilitar su manejo.

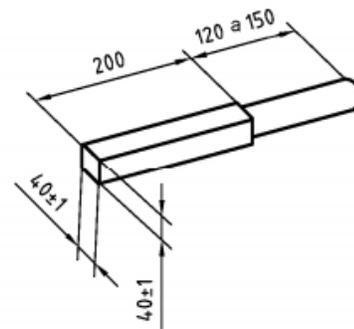


Ilustración 3-4 Maza de apisonar

- Una **regla**, de 700 mm con divisiones de 5 mm.
- Un **recipiente** para amasar el hormigón con una **pala** de boca cuadrada.
- Por último, se debe disponer también de un **trapo húmedo**, un **cogedor** de unos 100 mm de ancho y un **cronómetro o reloj** con una precisión de al menos 1s.

En cuanto al procedimiento: lo primero que hay que tener en cuenta es el método de obtención de la muestra de hormigón; el cual deberá seguir lo indicado en la norma EN 12350-1:1999; que de forma resumida nos indica que ha de ser homogeneizada mediante el uso del recipiente de amasado y la pala cuadrada previamente definidos.

Una vez tenemos la muestra de hormigón preparada, nos hemos de asegurar que la mesa de sacudidas está situada sobre una superficie plana y horizontal libre de vibraciones o sacudidas externas, asegurándonos que la tapa superior puede realizar todo su recorrido sin ningún problema. Posteriormente se limpian la mesa y el molde con agua, humedeciéndolos ligeramente, pero sin que sea excesivo.

Se procede a llenar el molde con hormigón, este deberá ser llenado en dos capas iguales usando el cogedor, nivelando cada capa mediante 10 ligeros golpes con la maza. Debe haber un poco de sobrante en la parte superior del molde, en caso de no haberlo se añadirá más hormigón.

Una vez transcurridos 30 segundos desde que se ha nivelado el hormigón, se eleva despacio el molde verticalmente y se procede a hacer sacudidas sin que se produzca impacto alguno en la operación, 15 veces, empleando entre 2s y 5s en cada ciclo.

Para la medida del esparcimiento, se procede a medir con la regla la dimensión máxima en las dos direcciones d1 y d2 (obsérvese la fig. 3-4). También deberá

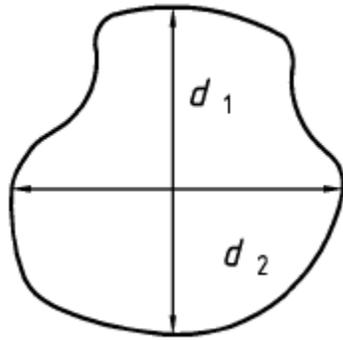


Ilustración 3-5 Medida del esparcimiento

comprobarse la segregación de este, se anota si lo ha habido ya que en caso de haberlo el ensayo se considerará no satisfactorio. El resultado del ensayo será $(d_1+d_2) / 2$, redondeando este valor a los 10 mm más próximos.

Por último, el informe final sobre este ensayo deberá incluir los siguientes datos:

- Identificación de la muestra.
- Lugar de realización.
- Fecha de realización.
- Cualquier indicación sobre la segregación del hormigón.
- Resultado del ensayo.
- Desviación (en caso de haberla) de este método de ensayo normalizado.
- Declaración de la persona que realizó el ensayo confirmando que fue realizado de acuerdo con la norma, excepto lo indicado en el punto anterior.
- Temperatura de la muestra de hormigón en el momento del ensayo.
- Hora del ensayo.

3.1.3 Ensayo mediante consistómetro Vebe

Este tipo de ensayo está explicado detalladamente en la norma UNE-EN. Es bastante similar al de la mesa de sacudidas, con la principal diferencia que en este se coloca un disco transparente sobre la parte superior del hormigón, posteriormente se pone en marcha la mesa vibratoria y se mide el tiempo que tarda la cara inferior del disco en cubrirse con la pasta. A dicho tiempo se le llamará tiempo Vebe.

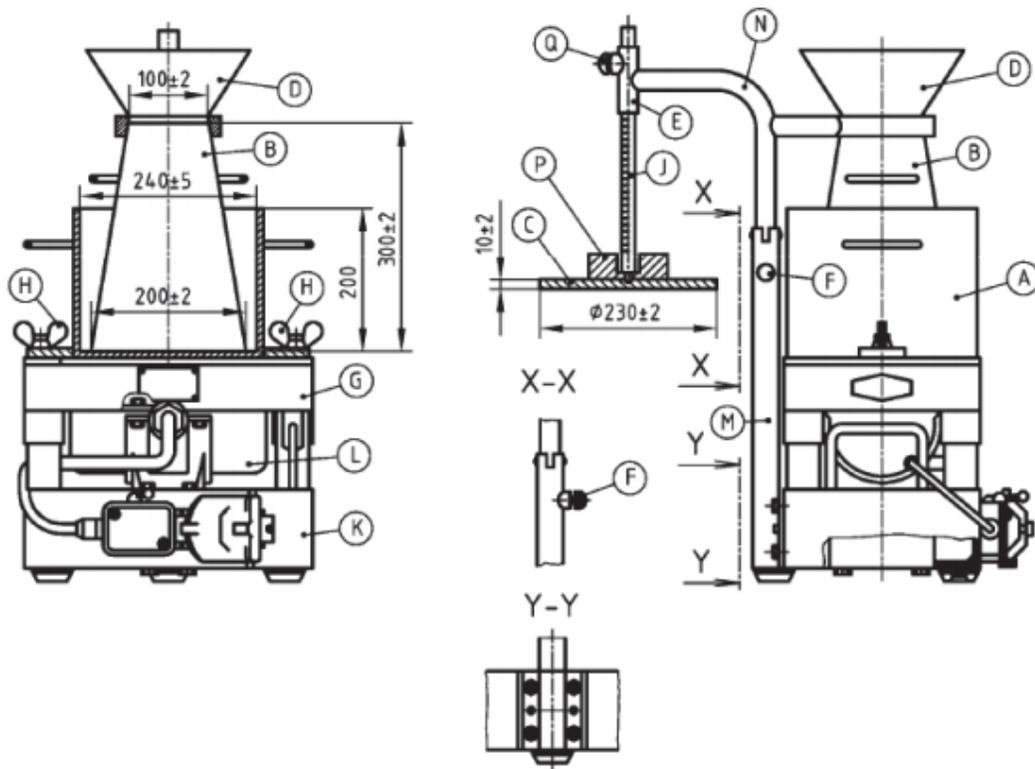


Ilustración 3-6 Consistómetro Vebe (medidas en mm)

Para realizar este ensayo se requiere de un consistómetro Vebe, el cual está formado por:

- Un recipiente de forma cilíndrica (A), con abrazaderas de refuerzo, permitiendo estas últimas asegurar la fijación en la parte superior de la mesa vibratoria (G) mediante palomillas (H).
- Un molde, que debe tener forma de cono con un diámetro en la base de unos 200 mm, en la parte superior de unos 100 mm, teniendo una altura de unos 300 mm. Deberá tener también a dos tercios de su altura un par de asas que permitan su levantamiento en dirección vertical cuando la muestra haya sido moldeada.
- Un disco (C) transparente, horizontal, unido a una barra (J) la cual deslizará a través de una guía (E) montada en un brazo articulado (N) que podrá fijarse con un tornillo (Q). Este también sostiene un embudo (D) alineado concéntricamente con la base superior del molde. Deberá disponerse de un peso (P) colocado directamente sobre el disco que hará que el conjunto móvil barra-disco-peso tenga una masa de unos 2,75 Kg.
- La mesa vibratoria (G), soportada por cuatro amortiguadores de caucho alojados en la base hueca (K), que a su vez descansa en tres pies de caucho. Con esto conseguimos aislar la mesa vibratoria de otro tipo de vibraciones externas a la máquina que pudiera haber. El vibrador deberá funcionar con una frecuencia de entre 50 y 60 Hz y la amplitud vertical deberá ser de aproximadamente $\pm 0,5$ mm.

- Barra compactadora, cronómetro, recipiente de reamasado, pala y cogedor.

La muestra para el ensayo deberá ser obtenida según lo indicado en la norma UNE-EN1350-1 (AENOR 2009). Posteriormente deberá ser homogeneizada con el recipiente de reamasado y la pala cuadrada.

Se deberá colocar el aparato de ensayo en una base rígida y horizontal, sujetando firmemente el contenedor a la mesa vibratoria mediante las palomillas (H). Se humedece el molde y se coloca el contenedor. A continuación, se fija el embudo mediante el tornillo (F) para que el molde no pueda levantarse del fondo del contenedor.

Se llena el molde en tres capas, de 1/3 de la altura del molde, del mismo modo que en el cono de Abrams, compactando cada capa con 25 golpes de la barra compactadora distribuyéndolos de forma uniforme sobre toda la sección transversal de cada capa.

Una vez compactada la última capa, se afloja el tornillo (F), se levanta el embudo (D) y se gira cuidadosamente y se vuelve a apretar dicho tornillo en la nueva posición. Asegurándose de que el molde no se levanta ni se mueve, y que no cae hormigón en el contenedor (A), se retira el hormigón sobrante con la barra compactadora. Una vez finalizado este procedimiento de compactación del hormigón, se procede a retirar el molde levantándolo cuidadosamente en vertical.

Este levantamiento se deberá llevar a cabo sin ningún tipo de torsión ni movimiento lateral en 5 y 10 segundos.

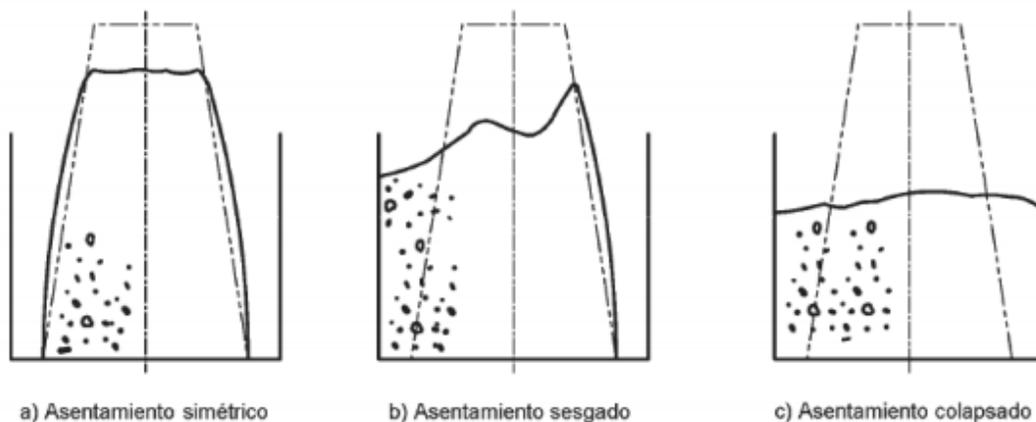


Ilustración 3-7 Formas de asentamiento

Si el hormigón asienta de alguna de las formas que se indican en la ilustración 3-7, deberá ser anotado en el informe del ensayo.

A continuación, se procede a realizar el ensayo: primeramente, se deberá girar el disco transparente sobre la parte superior del hormigón, en cuanto éste toque el punto más alto del hormigón (siempre que haya habido un asentamiento correcto), se aprieta el tornillo (Q) y se anota el valor de la escala (J). Seguidamente, y también en caso de que no se haya producido un asentamiento correcto, se aflojará el tornillo (Q) y dejar que el disco deslice para apoyarse en el hormigón.

Finalmente, se pone en marcha la mesa vibratoria y el cronómetro de forma simultánea, observando a través del disco transparente como responde el hormigón. El ensayo se dará por finalizado una vez el hormigón cubra toda la superficie del disco.

El resultado del ensayo será este tiempo, llamado tiempo Vebe, que deberá ser registrado con una aproximación de un segundo como máximo, y representará la consistencia del hormigón (cuanto mayor sea mayor será).

3.1.4 Otros ensayos

Además de los 3 ensayos comentados anteriormente por ser los más usuales, existen dos más que únicamente serán nombrados a título informativo, debido básicamente a la poca frecuencia con la que se usan, y a su poca relevancia con respecto al objetivo de este documento y que por lo tanto no serán analizados:

- Contenido de aire ocluido.
- Densidad del hormigón fresco.

3.2 Ensayos del hormigón endurecido

Este apartado es el más importante y el que más a fondo se analizará, puesto que estos tipos de ensayo (concretamente aquéllos cuya finalidad sea de información o de control) forman parte del mercado que pretende abarcar el sistema de sensores de temperatura y humedad para la monitorización del estado del hormigón.

3.2.1 Razones para la extracción de probetas testigo

La actual Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), establece que, en caso de requerir estimar la resistencia del hormigón de una parte determinada de la obra, sea por el motivo que sea, podrán extraerse testigos del hormigón de la estructura. Sin embargo, no se establece ningún procedimiento para realizar la evaluación, que puede ser afectada por factores tales como la compactación y el curado al que ha sido sometido.

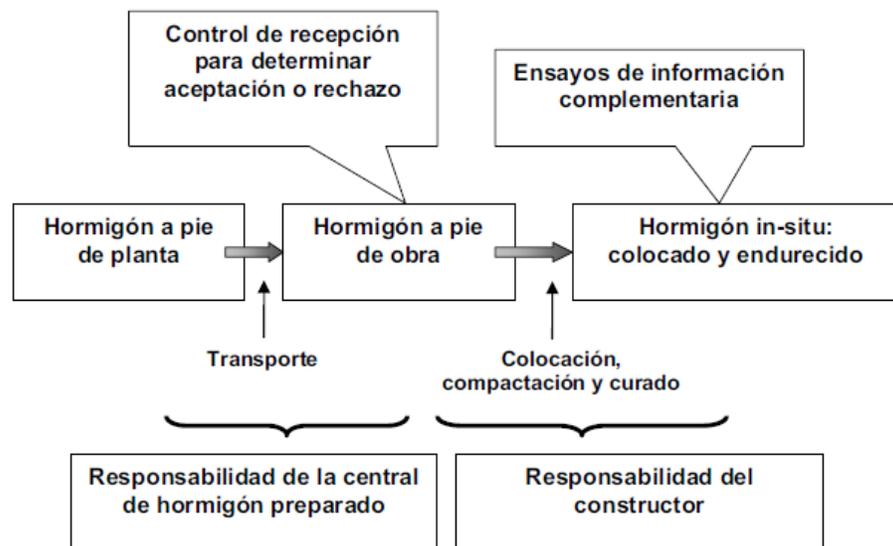


Ilustración 3-8 Ciclo de fabricación del hormigón preparado y responsabilidades

A partir de la ilustración 3-8, es fácil comprender que los testigos nos darán información sobre el hormigón in-situ, los cuales reflejarán si el proveedor del hormigón y el constructor han realizado correctamente su trabajo. Sin embargo, estas pruebas no serán comparables con aquellas realizadas directamente a partir de probetas cilíndricas fabricadas específicamente para ser ensayadas, ya que estas

miden la calidad de hormigón a pie de obra, en condiciones de plena compactación y curado ideal durante 28 días.

El hormigón de la estructura del cual se extraerán los testigos, sin embargo, habrá sido curado casi siempre en unas condiciones más desfavorables al estándar que rige la norma, y posiblemente habrá sufrido una compactación menor. Por ejemplo, si comparamos los resultados de testigos extraídos de la parte inferior de los muros o pilares de una obra pueden diferir hasta un 30% de aquellos extraídos de la parte superior.

Debido a estas diferencias previamente mencionadas entre los resultados de los testigos y los de las probetas normalizadas, estimar la resistencia potencial a pie de obra a partir de testigos es un proceso muy delicado.

En España la única norma referente a la extracción de testigos aún se puede encontrar en la EHE y por tanto es de obligado cumplimiento, pero ha sido anulada por AENOR y sustituida por la norma europea UNE-EN- 12504-1:2001.

Se trata de unos ensayos cuya importancia es crítica, basándonos por ejemplo en el caso de un viaducto, determinarán el momento en el que se empiecen a hacer los ensayos de carga que verifiquen la seguridad y la integridad de la estructura.

3.2.2 Planificación y trabajo preliminar

Se debe planificar un procedimiento de actuación. Para ello se deberán reunir a pie de obra todos los responsables de estos procedimientos: los responsables de la extracción de testigos, los del laboratorio, etc. y pactar los siguientes puntos:

- La necesidad de estos ensayos y su objetivo. Por ejemplo, si el objetivo es determinar la resistencia del hormigón en el suministro, dichos ensayos se realizarán con probetas estándar.
- Localización del hormigón que se encuentra bajo sospecha (zonas críticas de la estructura, evaluaciones mediante técnicas no destructivas, etc.) y propuesta de lugares de extracción (número y tamaño de los testigos).
- Niveles de calidad requeridos por la especificación (resistencia del hormigón a pie de obra) o por el proyecto (resistencia del hormigón in-situ), y consecuencias que podría tener el incumplimiento de los mismos.
- Responsabilidad de cada una de las partes.
- Si fuese necesario, otro tipo de ensayos auxiliares: determinación de la densidad de los testigos, historia del curado del hormigón en la estructura, etc.

3.2.3 Tamaño, número de muestras, localización y procedimientos de extracción

Tomar una decisión respecto a qué tamaño deberán tener las muestras es un procedimiento crítico, pues a mayor tamaño del testigo, mejores resultados. Sin embargo, no siempre es posible extraer el testigo ideal.

El tamaño ideal de los testigos es de 150 mm de diámetro, y una esbeltez de 2 (300 mm de largo). Con esta forma y tamaño no será necesario introducir ningún coeficiente de corrección de forma respecto a la resistencia determinada sobre probetas estándar. Sin embargo, tal y como hemos explicado previamente, por ejemplo, en una situación de hormigón armado, el testigo ha de estar exento de barras de refuerzo, por tanto, en este caso (y en muchos otros), extraer un testigo de 150mm no será posible. La norma UNE-EN 12504-1:2001 sugiere que en caso de hormigones con un tamaño máximo de árido igual o inferior a 25mm, sería una opción válida utilizar testigos de 100 milímetros.

Como norma general, se acepta que la relación entre el tamaño máximo del árido y el diámetro del testigo debe ser mayor que 3 para poder considerar los resultados fiables. Se han publicado datos respecto al muestreo y ensayo de testigos con diámetros por debajo de los 50 mm (Bungey 1979), aunque en general a menor diámetro, menor es la resistencia, y por consecuencia menor la precisión de dichos ensayos. Se estima que para obtener la precisión propia de un ensayo con testigos de 100 mm con testigos de 50 mm hace falta un número de testigos del orden tres veces mayor (Neville 1995).

La norma EN 13791 sugiere que la evaluación de la resistencia del hormigón en una zona determinada debe estar basada en los resultados de al menos nueve testigos de 100 mm, mientras que la resistencia de un elemento estructural concreto debe estimarse a partir de un mínimo de 3 testigos; si estos fueran de 50 mm de diámetro, estos números deberán triplicarse.

3.2.4 Localización y extracción de los testigos

Los puntos donde se realizará la extracción de los testigos dependerán del objetivo del ensayo:

- Si el objetivo del ensayo es estimar el efecto de una sobrecarga, un ataque químico, fuego o explosión, es recomendable definir el área afectada previamente mediante algún tipo de ensayo no destructivo, tal como el martillo Schmidt o ultrasonidos, para posteriormente extraer testigos tanto de la zona ensayada como de un área sana a efectos de comparación. Con este resultado se podrá evaluar tanto la resistencia del hormigón in-situ como la reducción de resistencia causada por el daño.
- Sin embargo, si la finalidad del ensayo es la evaluación de un hormigón nuevo que no ha superado los criterios de aceptación, la primera acción debería ser localizar dicha partida dentro de la obra, de tal modo que los testigos extraídos únicamente sean del material a evaluar.

La altura del vertido como se ha comentado previamente afecta de forma notable al grado de compactación y densidad del hormigón, y por lo tanto también a su resistencia, llegando a haber diferencias de hasta un 25% entre la parte superior y la inferior de un muro o pilar. Es por esta razón que debe evitarse extraer testigos de la zona situada en el tramo superior del 20% de las dimensiones del elemento a

analizar, y nunca a menos de 50 mm del extremo final, a menos que la zona de sospecha esté situada en esa zona. También deberán eliminarse los primeros 5 cm de recubrimiento de la probeta, ya que estos habrán experimentado condiciones de curado muy distintas a las del hormigón del cuerpo central del elemento.

Otro factor a tener en cuenta cuando se extrae un testigo es la orientación de este respecto a la dirección en la que se ha hormigonado el elemento. Aquellos testigos que han sido extraídos en la dirección del hormigonado pueden tener una resistencia entre un 5 y un 8% mayor que la de aquellos extraídos en dirección horizontal.

Seguidamente, tal y como se ha comentado previamente, se deberá evitar extraer testigos que estén unidos a barras de refuerzo, dado que puede condicionar muchas veces el tamaño del testigo en función del diámetro de las barras de refuerzo y su espaciamiento.

La extracción de los testigos debe realizarse por personal experimentado, con un equipo calador refrigerado con agua y coronas de corte diamantadas. El bastidor deberá fijarse al hormigón mediante tornillos de anclaje, y deberá prestarse mucha atención a la velocidad de giro y el avance de la herramienta para asegurarse que el testigo se extrae siempre en la dirección perpendicular a la superficie. Una vez extraídos, deberán ser envueltos en un filme impermeable, numerados e identificados de forma que se pueda saber localización dentro de la estructura y dirección de extracción.

Además, se deberán realizar una serie de exámenes y medidas visuales:

- Estado de compactación, presencia de poros, imperfecciones tales como fisuras u indicios de segregación, tipos de árido y forma de las partículas.
- Asegurar la homogeneidad entre los testigos de una misma zona.
- Granulometría de los áridos: continua/discontinua.
- Medida de la masa y densidad del testigo por inmersión, tras dos días de conservación en balsa.

3.2.5 Acondicionamiento de los testigos, medida de la densidad y del exceso de poros

El acondicionamiento de los testigos consiste en dejar las dos superficies de los extremos lo más lisas posibles, siendo el método preferido el pulido de estas. También puede emplearse el refrentado mediante mortero de azufre, teniendo en cuenta que el espesor del refrentado ha de ser lo más fino posible.

Las condiciones de saturación con las que se ensayan los testigos dependerán de si se busca obtener la resistencia del hormigón in-situ o a pie de obra:

- En caso de analizar la resistencia del hormigón a pie de obra, se recomienda ensayarlos en condiciones de saturación: se considera que tras una inmersión durante 40 horas de los testigos en balsa de curado con agua a temperatura controlada de entre 18 y 22 ° C es suficiente para saturar la mayor parte de los poros del testigo.
- Si se busca analizar la resistencia in-situ de elementos que van a permanecer secos en condiciones de servicio, resultará más apropiado secar los testigos.

Para calcular la densidad y analizar si hay un exceso de poros en un testigo se sigue el siguiente procedimiento:

- Tanto si se va a utilizar el pulido como si se va a usar el método del refrentado para adecuar las dimensiones del testigo al ensayo, una vez finalizado este procedimiento se deberá sumergir en agua a 18-22 ° C.

- Una vez transcurridas 40 horas, se deja secar el testigo hasta que no se observa humedad en la superficie, y se pesa. A esta masa la denominaremos masa al aire en condiciones de saturado con superficie seca (M_{SSS}). Inmediatamente después de pesarlo, se medirá su volumen mediante pesaje hidrostático o por desplazamiento de agua (V_t).
- Quedará definida la densidad del testigo en condiciones de saturación con superficie seca:

$$D_{SSS} = \frac{M_{SSS}}{V_t}$$

- En caso de que el testigo lleve alguna barra embebida, esta deberá ser extraída y conservada tras el ensayo a compresión, determinando su masa (M_r) y volumen (V_r) por pesaje hidrostático o desplazamiento de agua. En este caso la densidad del hormigón se calculará como:

$$D_{SSS} = \frac{M_{SSS} - M_r}{V_t - V_r}$$

- En el caso de querer conocer la resistencia del hormigón en condición seca, tras la determinación de la densidad de los testigos en condiciones de saturación con superficie seca, estos se dejarán secar durante 48 horas en estufa entre 45 y 50 °C, pudiéndose realizar este secado en hormigones con edades superiores a los 28 días. Una vez transcurrido este tiempo, se pesa el testigo (M_s) y se determina su densidad en estado seco como:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t}$$

Una vez conocidas tanto la densidad en condición de seco como en condición de saturado, se puede calcular el coeficiente de absorción de agua aparente y la porosidad aparente del hormigón con las siguientes ecuaciones:

$$Ab(\%) = \frac{D_{sss} - D_s}{D_s} \cdot 100$$

$$P(\%) = \frac{M_{sss} - M_s}{V_t} \cdot 100$$

Estos valores son indicativos de posibles defectos de compactación debido a una mala ejecución del trabajo. Para un hormigón de 25 MPa bien compactado, los valores típicos y aceptables serían de 7,5-9% en cuanto a coeficiente de absorción, y de entre un 10 y un 15% en cuanto a porosidad aparente. Un hormigón mal compactado, sin embargo, puede presentar porosidad aparente superior al 30%.

Sin embargo, no se puede confundir este coeficiente de porosidad aparente con el porcentaje de poros en exceso respecto al hormigón en su estado de compactación ideal. El mejor modo de calcular este porcentaje es a partir de la densidad en saturación con superficie seca (D_{sss}), y el valor de densidad del hormigón en condiciones de máxima compactación (D_p), que será obtenido de las probetas cilíndricas fabricadas mediante los procedimientos estándar. Dicho exceso se calcularía con la siguiente ecuación:

$$\text{Poros en exceso (\%)} = \frac{D_p - D_{SSS}}{D_p - k \cdot 1000} \cdot 100$$

En esta ecuación, k es una constante relacionada con la forma que representa la fracción de poros llenos de agua, en la mayoría de los casos se puede asumir que es 0,5.

Antes del ensayo a compresión, se realizan las mediciones sobre el testigo:

- El diámetro se determina en las circunferencias situadas a un cuarto, mitad y tres cuartos de la altura de éste.
- La longitud se determina sobre el testigo una vez refrentado o pulido, y se redondea al milímetro.

El ensayo a compresión se realizará según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 1390-3.

3.2.6 Interpretación de los resultados de resistencia de los testigos

Los resultados de estos ensayos a compresión no deberán ser tomados al pie de la letra, ya que hay múltiples factores que afectan a dichos resultados y requieren de coeficientes de corrección para ser normalizados. Por tanto, la relación entre la resistencia del hormigón in-situ y la resistencia del testigo se verá afectada por los siguientes factores:

- El primer factor (K_1) irá relacionado con la esbeltez del testigo. A continuación, se adjunta una tabla con los valores de este factor según la esbeltez para probetas cilíndricas.

Esbeltez	2	1,75	1,5	1,25	1,1	1
K_1	1	0,98	0,96	0,94	0,90	0,80

- El segundo factor (K_2), va relacionado con la dirección de carga respecto al hormigonado y ha sido explicado previamente.
- El tercer factor (K_3), va relacionado con la presencia de armaduras, que puede llegar a reducir hasta en un 5% la resistencia. Una de las ecuaciones mas típicas para calcularlo, es la propuesta por la *Concrete Society Technical Report*:

$$K_3 = \left[1 + 1,5 \cdot \sum_i \left(\frac{\Phi_{bi}}{\Phi_t} \cdot \frac{h_i}{l} \right) \right]$$

En la que:

- Φ_{bi} = diámetro de la barra.
- Φ_t = diámetro del testigo.
- h_i = longitud del testigo.
- l = longitud del testigo.
- I = número de barras embebidas.

En caso de que la desviación sea superior al 13% sobre valores contrastados en testigos de la misma zona, se rechaza directamente el resultado.

Finalmente utilizando estos tres factores de corrección obtenemos una ecuación que nos relaciona la resistencia del hormigón in-situ ($f_{c,u}$) con la resistencia del testigo ($f_{c,t}$):

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

Si lo que queremos es llegar a obtener un valor que nos permita evaluar la calidad del hormigón provisto por el fabricante ($f_{c,e}$, hormigón a pie de obra, tal y como se ha mencionado previamente), es necesario extrapolar la resistencia del hormigón in-situ con otros tres factores de corrección:

- El primer factor (K_4) va relacionado con las condiciones de compactación, que se detallan en la siguiente tabla (propuesta también por el CSTR) en función del porcentaje de aire en exceso previamente explicado:

Porcentaje de aire en exceso	Factor de corrección por compactación K_4
1	1,08
1,5	1,13
2	1,18
2,5	1,23
3	1,28
3,5	1,33

4	1,39
4,5	1,45
5	1,51

- El segundo factor (K_5), va relacionado con las condiciones de curado.
En la siguiente figura se puede observar el valor de este factor en función de la edad y las condiciones de curado.

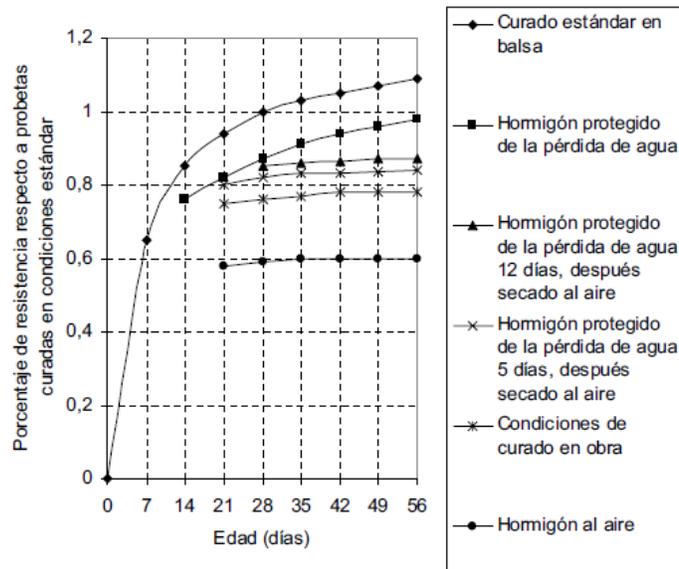


Ilustración 3-9 Efecto de curado en la resistencia (CSTR N° 11)

- Por último, el factor K_6 va directamente relacionado con la edad del hormigón; puesto que la resistencia de hormigón a pie de obra se

determina a la edad de 28 días, se considera que a esta edad el factor es 1. A continuación, se muestran los valores propuestos por la EHE en su artículo 30.4:

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

Ilustración 3-10 Coeficientes de conversión del hormigón por edad

Mediante el uso de estas 3 constantes, se obtiene la ecuación que relaciona la resistencia del hormigón in-situ, obtenida a partir de las probetas testigo, con la resistencia del hormigón a pie de obra ($f_{c,e}$), que es comparable a los obtenidos por probetas cilíndricas de 15x30, y que por lo tanto nos permite evaluar la calidad del hormigón provisto por el fabricante:

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

3.3 Costes de los ensayos usados actualmente

Para poder extraer conclusiones sobre los métodos más usados actualmente, el apartado económico es crucial. Para obtener un valor fiable, se resumirán los valores obtenidos por P. Aragón en su tesis *“Análisis de costes realizado sobre los ensayos realizados en laboratorios de control de edificación sobre hormigón y acero”* (UPV, 2001).

En este informe, se consideran dos escenarios de trabajo para un laboratorio: uno optimista con mucha carga de trabajo y uno pesimista con poca. Para este apartado se tomarán los valores medios entre ambos pues no es la finalidad de este trabajo.

Por ello hay que tener en cuenta:

- El porcentaje del total que representan, en un laboratorio del sector, los ensayos de probetas de hormigón: en la mayoría de los laboratorios analizados, este representa el 90% o más del total de la actividad realizada (unos 22-23 mil ensayos al año).
- El coste del gasoil es también un factor crítico dado que todas las muestras se transportan viajan en furgoneta, y como ya sabemos, la tendencia de este valor es siempre al alza, ya sea por motivos fiscales o porque aumenta el precio del barril de petróleo. En este caso, se propone un coste de 1,2€/litro. El coste medio de un vehículo para

transportar estas muestras: en la mayoría de los casos se trata de una furgoneta cuyo precio se considerará de unos 18.000 euros, teniendo en cuenta que se deberá amortizar en unos 5 años (pues es la vida media estimada que se le da a este tipo de vehículos en las condiciones de trabajo de las que hablamos). Se considera que la aportación de esta parte al coste unitario es de 4,03€.

- La mano de obra, formada por:
 - Un departamento de administración, se considera que siempre será necesaria una persona en este departamento, que dedicará el 90% de su tiempo a los ensayos del hormigón.
 - Operarios, cuyo sueldo va enlazado con el sueldo medio de un peón especialista, y se consideraran necesarias unas 15 personas que dedicarían el 90% de su tiempo a esta tarea.
 - Gestores de obra, enlazados con el número de operarios, se necesita 1 por cada 4-6 operarios, por tanto, en este caso se considerarán 3.
 - Técnico superior: se considerará que se necesita 1.

Se considera que al coste unitario de cada informe la mano de obra suma unos 31,25€

- Herramientas y utensilios utilizados para la toma de muestras, formados por:

- Cogedor: se considera un precio unitario de 11,20€ y un uso de unos 15 anuales.
- Barra compactadora, cono y mazo: el conjunto de los tres elementos cuesta unos 100€ y se considera un uso de unos 18 anuales.
- Bandeja/chapa base: se considera un precio unitario de aproximadamente 25€ y un uso de unos 2-3 anuales.
- Aguja, mesa vibrante o maza: anualmente se necesita una, cuyo coste es de 417,60€
- Llanas de acero: el coste unitario es de 9,80€ y se usan unas 7-8 por año.
- Recipiente de reamasado: su coste es de unos 40€ y se consideraran unos 12 anuales.
- Desencofrante: su coste es de unos 35€/bidón, siendo el uso de unos 25 bidones al año.
- Marcador de probetas: cada laboratorio usa uno diferente Se toma como valor medio unos 4€ (rotulador permanente), y un gasto de unos 150 anuales.
- Arpillera: se utiliza para proteger las muestras. El coste del rollo es de unos 300€, y se considerara un uso de 2-3 anuales.
- Flexómetro: el coste unitario es de unos 12€, y se considera un uso anual de unos 35.

- Termohigrómetro: coste unitario de 3€, siendo su uso de 1-2 anuales.

Se considera que las herramientas y utensilios aportan al valor del coste unitario unos 0,63€.

- Proceso de curado: es necesaria una cámara de curado independientemente de la carga de trabajo, cuyo precio medio ha sido considerado en 63.000€ con una amortización de 30 años. La sonda



Ilustración 3-11 Cámara de curado

tiene un coste medio de unos 4.000€ y se amortiza en 8 años. Este apartado tiene una aportación al coste unitario de unos 0,12€.

- Proceso de ajuste: tal y como hemos mencionado previamente, la norma permite realizar este proceso de distintas formas (mezcla de azufre, refrentado, etc.). El más utilizado por la mayoría de los laboratorios ha sido el de refrentado de mortero de azufre, posiblemente porque es también el más económico. Este proceso tiene unos costes que son amortizables y otros que no (los consumibles), cuyo precio es aproximadamente:
 - Azufre: 25€/saco, con un uso de unos 300 sacos/año.
 - Arena de sílice: 14,50€/saco, con un uso de unos 300 sacos/año.

- Aceite mineral: 30€/bidón, con un uso de unos 5 bidones/año.

En resumen, el proceso de ajuste aporta al coste unitario unos 0,97€.

- Proceso de rotura: en los apartados previos ya se ha mencionado que la máquina requiere de unos calibrados y mantenimiento periódico. De forma resumida, mencionamos que tiene un coste de unos 25.000€, y que según las administraciones en el epígrafe “Equipos de laboratorios y ensayos” dicha máquina deberá ser amortizada al 15%. Finalmente se calcula una aportación al coste unitario de unos 0,65€.
- Emisión del informe: en este apartado se considera hardware, software empleados, también los equipos informáticos, con una amortización a 3 años. Como consumible se considera el papel, ya que es como se emiten la mayoría de los informes. Este apartado tiene una aportación al coste unitario final del informe de unos 0,57€.

- Otros: en este apartado se consideran otros tipos de gastos: contenedores de recogida de residuos, acreditaciones, luz y agua, etc.

Se considera que tienen una aportación al coste unitario de 2,53€.

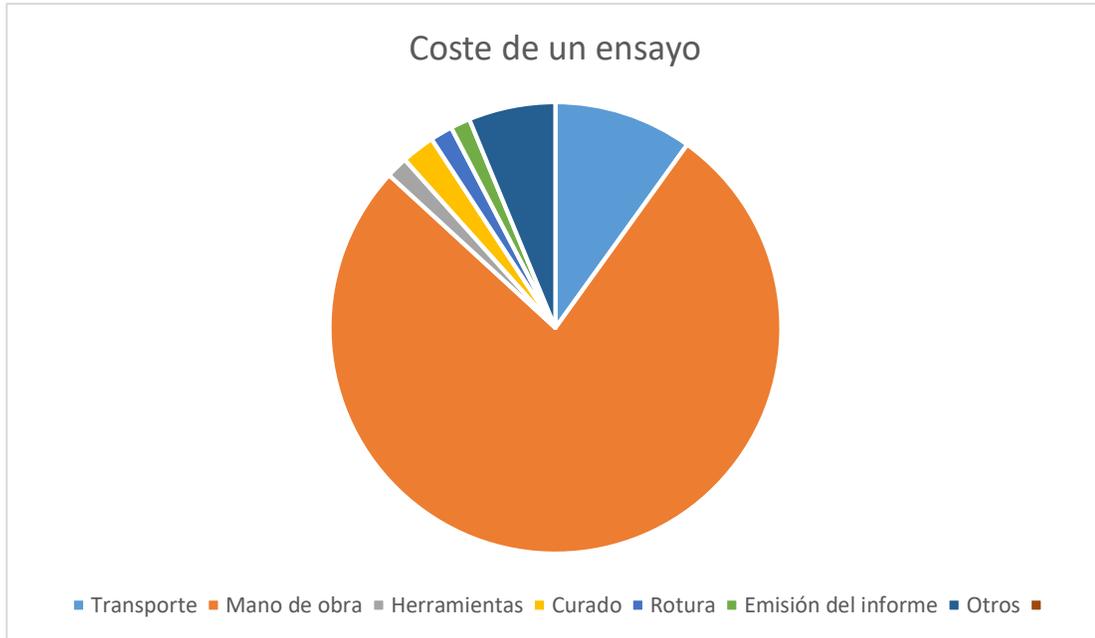


Ilustración 3-12 Costes de un ensayo de hormigón

Por lo tanto, si sumamos todo lo valorado previamente, vemos que el coste unitario de un informe de ensayo de testigo de hormigón es de unos 41€, siendo la mano de obra la partida con mayor coste.

3.4 Conclusiones

Después de analizar rigurosamente todos los métodos y normativas legales relacionadas con cómo se debe asegurar la integridad del hormigón, ha quedado claro que es un proceso costoso debido básicamente a:

- Necesidad de personal calificado: muchas de estas tareas requieren una formación muy específica, y por tanto no las puede realizar personal no cualificado. Además, tal y como se aprecia en el apartado anterior, la mano de obra es la que representa el mayor coste.
- Intervención de laboratorio de pruebas: tal y como hemos visto, los ensayos a compresión, entre otros, se realizan en laboratorios, y tienen unos costes muy elevados. Además, trabajan con unos márgenes muy ajustados, lo cual implica que son costes difícilmente reducibles.
- Dificultad logística: en todo este proceso interviene un grupo de trabajo que ha de estar bien coordinado y comunicado para que los ensayos sean fiables.
- Posibilidad de rotura de las probetas y baja repetibilidad de las pruebas: si a causa de un accidente se rompen o se pierden unos testigos concretos, será difícil y costoso volver a obtener unas muestras que cumplan los requisitos.

Como conclusión apreciamos que la forma más eficaz de conseguir reducción de costes en los ensayos sería a través de la reducción de la mano de obra necesaria.

Este tema se analizará en profundidad en los próximos apartados, teniendo en cuenta que si en vez de hacer ensayos destructivos – que requieren la fabricación de probetas o la extracción de testigos- se opta por el uso de sensores, la reducción de costes sería notable.

4 Tecnologías similares existentes

A continuación, se analizarán las tecnologías similares y que, en consecuencia, se podrían considerar competencia directa del objeto de estudio de mercado. Para que sean consideradas como tal, básicamente deberán cumplir:

- Basarse en el ensayo no destructivo: es decir, que no requieran la extracción, acondicionamiento y destrucción mediante máquina de ensayo en laboratorio de testigos extraídos de la estructura a analizar.
- Deberán usar también sensores inalámbricos, al menos para la transmisión de datos, pues la tecnología propuesta usa también esta tecnología para alimentar a los sensores.

4.1 Giatec Scientific Inc.

Giatec es una empresa con sede en Ottawa (Canadá), que se dedica al desarrollo y comercialización de controles de calidad no destructivos y al asesoramiento y venta de los productos relacionados con este sector.

Fue fundada en 2010 (hace 9 años), y su primer producto comercializado fue un sensor que detectaba la velocidad con la que se corroían las barras embebidas en el hormigón armado.

Centrándonos en el sector a analizar (ensayos relacionados con el hormigón), dispone de varios productos:

- SmartRock2: se trata de una serie de sensores alimentados por batería que registran la temperatura del hormigón de forma periódica. Los datos recabados se envían mediante bluetooth a un teléfono móvil que debe tener la aplicación correspondiente instalada.
- BlueRock: en este caso vemos una versión un poco más completa que la SmartRock2: estos sensores, además de tener una batería mayor que el mencionado previamente, registran también la humedad relativa y permiten personalizar factores tales como la frecuencia de registro, y otros.
- Smart Concrete: se trata de un sistema integral enfocado a los proveedores de hormigón que registra en tiempo real tanto el estado

del hormigón en el camión hormigonera como el que hay en obra, lo que permite tomar decisiones sin demora y optimizar todo el proceso.

4.1.1 SmartRock 2

En este caso de análisis nos centraremos en el producto SmartRock2, pues es el que haría competencia directa con nuestro producto:

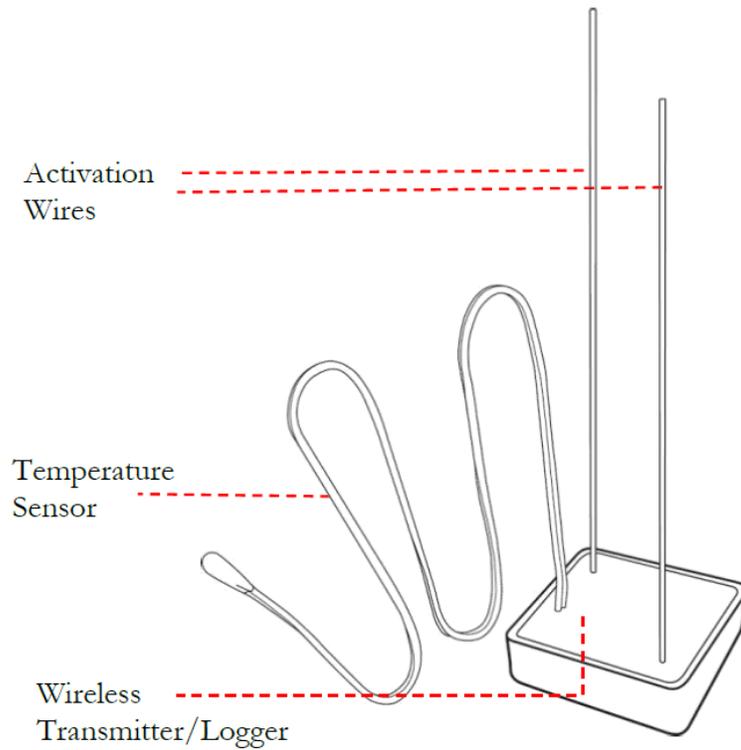


Ilustración 4-1 SmartRock 2

Como podemos ver en la ilustración, este sensor consta de un transmisor inalámbrico que enviará los datos mediante bluetooth al teléfono móvil.

Además, tiene también una sonda de temperatura, que está disponible en dos longitudes: 40 cm o 3 metros.

Por último, de este salen dos cables que hacen de interruptor de encendido, al unirse entre ellos se cierra el circuito de alimentación y se pone en marcha el sensor.

Su puesta en marcha es muy sencilla:

1. Hay que descargar la aplicación de Android/iOS para registrar los sensores previamente a su utilización. Para ello hay que encenderlos momentáneamente uniendo los dos cables, y asignarle un nombre/código que permita identificarlo posteriormente en obra. Dicha nomenclatura se escribirá también en el sensor, por ejemplo: pared 1, columna 1, etc.

2. En la ilustración de la derecha (4-2), se puede ver el esquema de conexión de este sensor. Como vemos en el mismo, se han de ajustar fuertemente los dos cables de encendido alrededor de una

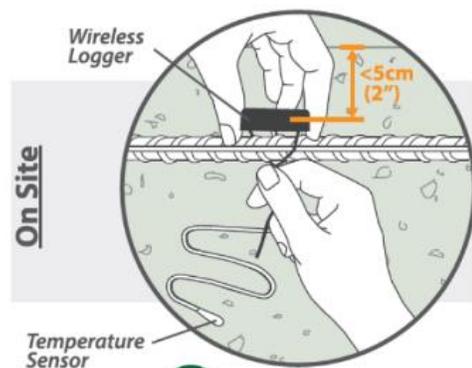


Ilustración 4-2 Esquema de conexión SmartRock2

barra de la armadura. Y para maximizar el alcance de la señal, este no deberá ser instalado a más de 5 cm de la superficie del hormigón.

3. Durante el vertido del hormigón, se deberá tener especial cuidado con la sonda y su cable. El fabricante recomienda atarlo a la barra de la armadura para evitar que se dañe (ilustración 4-3).

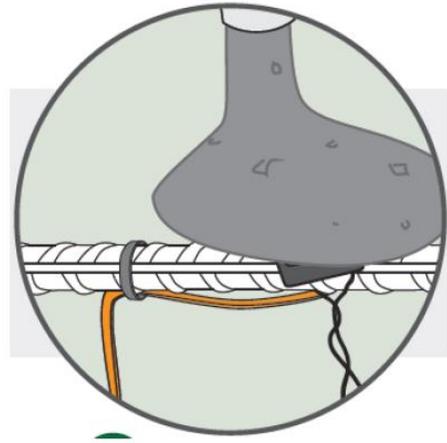


Ilustración 4-3 Esquema de conexión sonda SmartRock2

4. Por último, para obtener las lecturas, únicamente se deberá utilizar un teléfono móvil para obtener temperatura en tiempo real, madurez y resistencia (siempre y cuando se haya calibrado correctamente con la mezcla utilizada en obra).

4.1.2 Especificaciones técnicas

A continuación, se resumen sus especificaciones técnicas:

- Temperatura de operación del sensor: desde -20 a 60 ° C.
- Rango de lectura de temperaturas (sonda): desde -30 a 80 ° C.
- Precisión: 1 ° C.
- Frecuencia de lectura: máximo de una cada 15 minutos (para una vida útil de 2 meses).
- Memoria interna: 1500 lecturas.
- Alcance de la señal inalámbrica: hasta 8 metros (si se instala a 5 centímetros de la superficie; puede ser instalado hasta a 3 metros de profundidad, pero el alcance disminuirá notablemente).
- Dimensiones: 38 x 38 x 12 milímetros.
- Longitud de la sonda de temperatura: 3 metros.
- Duración de la batería: hasta 4 meses (puede ser inferior dependiendo de la frecuencia de lectura).
- Interfaz de análisis y comunicación: aplicación para Android, iOS e interfaz en la nube de Giatec.
- Normativa que cumple: ASTM C1074

A continuación, se adjunta un ejemplo del informe que genera todo este sistema:



Como podemos ver, en el informe sale de forma detallada la temperatura en función del tiempo, así como los máximos y mínimos alcanzados, y datos sobre cuándo y dónde se hizo la lectura.

Además, si el software esta calibrado correctamente con la mezcla de hormigón, se obtienen también las curvas de madurez en función del tiempo y la resistencia.

4.1.3 Caso real: DIVCON Inc.

Antes de usar esta tecnología, la empresa DIVCON Inc., ya utilizaba sensores para sus proyectos, aunque utilizaba sensores cableados. La decisión de utilizar sensores inalámbricos en vez de cableados supuso un gran avance para la empresa.

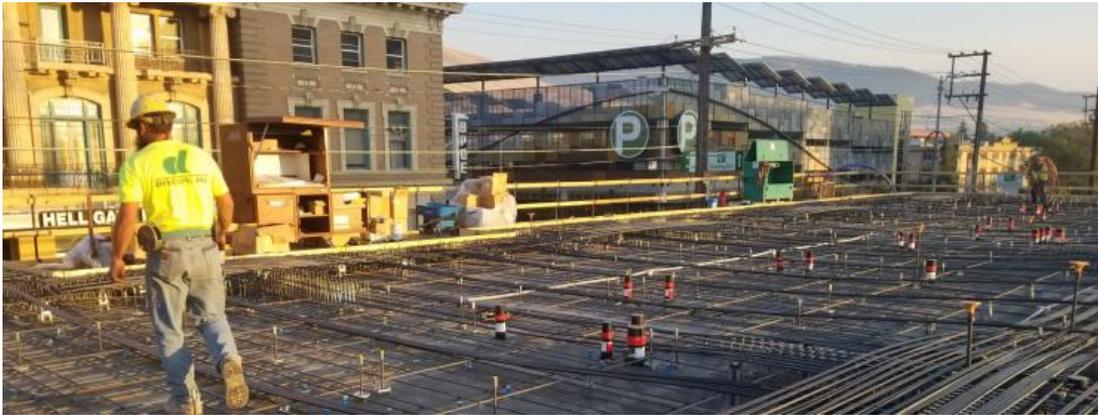


Ilustración 4-4 Plataforma de hormigón postensado

El primer proyecto en el que utilizaron este producto fue en la construcción de una plataforma de hormigón postensado elevada de 40.000 pies cuadrados. El Project Manager de este proyecto, había leído sobre esta tecnología en un artículo de una revista sobre construcciones de Hormigón y decidió aplicarla para este proyecto.

Para este proyecto utilizaron un total de 18 sensores distribuidos a lo largo del perímetro de la plataforma. Giatec colaboró a lo largo de este proyecto para asegurarse de que las mezclas, que deben ser introducidas en el software para obtener las funciones de madurez que se utilizaran para estimar la resistencia del hormigón, se introducían correctamente. Una vez obtenidas para las mezclas más comúnmente utilizadas por la empresa constructora, estas curvas podrán ser reutilizadas en otros proyectos.

Una de las grandes ventajas destacadas por el Project Manager, es la de poder delegar la tarea de tomar mediciones en operarios que estaban en la obra, y poder compartir dichos resultados para la toma de decisiones con todo el equipo involucrado. Además, observaron que la fiabilidad y la precisión de este sistema era mayor que la de los ensayos destructivos utilizados tradicionalmente.

Finalmente, podemos concluir que para este caso la experiencia con ellos fue totalmente positiva, pudiendo únicamente mejorarla si la duración de la batería de estos sensores hubiese sido mayor, de forma que los sensores instalados hubiesen aportado datos durante más tiempo.

4.1.4 Caso real: Girlchrist Construction Company

Este caso es de importante mención, pues se trata de una construcción de un puente que fue iniciada en marzo de 2017, y pudo abrir al tráfico en el mes de octubre.

Se ha calculado que el uso de este tipo de sensores redujo entre 3 y 4 meses la duración total de la obra.



A pesar de utilizar esta tecnología, realizaron 28 ensayos destructivos en testigos obtenidos de la estructura pues era la primera vez que utilizaban este tipo de sensor y debían verificar su precisión. Los resultados fueron positivos.

Para esta empresa, una de las mayores ventajas que les aportó este producto, fue que, al tratarse de una obra pública, podían compartir los datos de forma rápida y fiable con los otros 10 ingenieros que trabajaron en este proyecto desde el mismo teléfono móvil.

Uno de los mayores problemas iniciales fue el calibrar y obtener funciones de madurez adaptadas al hormigón que estaban utilizando. Por ello planean en un futuro seguir utilizando estos sensores, pero plantean cambiar su proveedor de hormigón a uno que trabaja con la tecnología Smart Concrete, pudiéndose ahorrar así todo el trabajo de calibrado.

4.1.5 Conclusiones

A continuación, detallamos las ventajas y los inconvenientes encontrados en este producto. Como ventajas tenemos:

- La primera es evidente, pues este sistema nos aporta la posibilidad de tomar decisiones y compartir información en tiempo real.
- No hay ninguna suscripción ni licencia asociada a este producto. Una vez se han adquirido los sensores, la aplicación de Android/iOS es gratuita y se puede utilizar por tiempo indefinido, siendo el único factor limitante en este aspecto la vida útil del propio sensor.
- Este sistema elimina la necesidad logística de ser necesaria mucha mano de obra en el lugar de análisis, con una persona que tenga la aplicación en el teléfono y pueda recopilar los datos de los sensores es suficiente. Una vez obtenidas estas lecturas, se pueden compartir con tantas personas como sea necesario y en cualquier lugar del mundo. Por tanto, permite monitorizar el estado de la estructura desde cualquier sitio.
- Nos permite verificar la seguridad e integridad estructural del proyecto tantas veces como sea requerido y sin aumentos considerables de costes.
- Se evitan costes inesperados que podrían surgir de un testigo que se rompe o se pierde durante el transporte u otro tipo de incidencias.

- Una vez se obtiene una función de madurez para una mezcla de hormigón concreta, esta podrá ser reutilizada en un futuro tantas veces como se desee siempre y cuando se respete la proporción de componentes del hormigón.
- Disponen de una calculadora en su página web que, mediante los metros cúbicos de hormigón y el número de vertidas, estima el ahorro, tanto en tiempo como económicamente hablando.
- Al ser una tecnología bastante utilizada en el mercado hay datos fiables de casos reales.

También tiene una serie de inconvenientes que es importante resaltar:

- El cable que va del sensor a la sonda debe ser atado a una barra de la armadura para evitar que sufra daños.
- Funciona con batería, por tanto, su vida útil es limitada.
- Los cables de encendido son delicados y deben ser tratados con cuidado.
- Tiene una capacidad de memoria máxima de 1500 lecturas, y por lo tanto es un factor a tener en cuenta dependiendo de la frecuencia de lectura que necesitemos.
- Si se quiere utilizar todo su sistema de gestión integral, se limita la posibilidad de elección de proveedores de hormigón a aquellos que utilizan el producto Smart Concrete.

Por último, después de haber contactado con la empresa distribuidora de este producto en España (Proetisa) el precio de cada sensor es de 125 €. Así pues, vemos que se reducen los costes de forma notable respecto al uso de ensayos destructivos.

4.2 Wake Inc.

Esta empresa tiene más de 25 años de experiencia en el sector, y ha participado en más de 1.000 proyectos en los que ha aportado todo el sistema de sensores para monitoreo del hormigón.

Todos sus sistemas de sensores cumplen con la norma ASTM C1074 y se basan en el monitoreo de la temperatura que, mediante el uso de función de madurez, nos da también la madurez y resistencia de este.

Disponen de 2 productos que serán analizados:

- HardTrack Cloud Sensor: basado en la nube.
- HardTrack Mobile: similar al sistema de Giatec con la diferencia que también dan la opción de utilizar un dispositivo que suministra el fabricante para hacer las lecturas en lugar de un teléfono móvil o una Tablet.

4.2.1 HardTrack Cloud Sensor

Esta es su tecnología más innovadora, pues se trata de un sistema basado en la nube que elimina completamente la necesidad de intervención humana para la lectura de los resultados.



Ilustración 4-5 HardTrack Cloud

En la ilustración adyacente (4-5) vemos el dispositivo en sí, que mediante el uso de tecnología 3g y 4 sondas de tipo cable + una que lleva incorporada para la temperatura ambiente, va leyendo los valores y los envía a la nube.

Los resultados se pueden leer tanto des de un móvil Android, un iPhone, un Tablet, o un ordenador, y se pueden configurar también alertas configuradas según las restricciones de temperatura que se introduzcan en el sistema.

Para utilizar este producto, los pasos a seguir son:

- Se sitúan las sondas de temperatura en la estructura, teniendo en cuenta que las 4 han de estar conectadas al dispositivo 3g.
- Se vierte el hormigón.
- Una vez conectadas las 4 sondas al dispositivo 3g, este recaba los datos y los envía a la nube.

- En caso de que alguna sonda se moviera o hubiese algún problema en alguna de estas, saltaría un aviso.
- Como el dispositivo 3g queda a la vista, se le puede reemplazar la batería (que tiene una vida útil de hasta 3 años), o utilizarlo en otra estructura cuando la primera deja de tener necesidad de monitoreo.

Cada HardTrack Cloud incluye:

- Un sensor de temperatura ambiente que va en el mismo dispositivo 3g.
- 4 puertos que permiten conectar hasta 4 sondas de temperatura que vienen en distintas longitudes.
- En un futuro próximo, Wake Inc. Incluirá un puerto adicional donde se podrá conectar además un sensor de temperatura y humedad.

4.2.2 HardTrack Mobile

Este sistema es menos innovador en el sentido que no utiliza la nube, sino que se basa en la misma idea que el SmartRock 2 de Giatec, con una serie de diferencias importantes.

Se basa en el uso de RFID (*Radio Frequency Identification*), sistema que, mediante transpondedores, responden a peticiones por radiofrecuencia desde un emisor-receptor RFID. Por tanto, para este sistema no sirve con un teléfono móvil o una Tablet por sí solas, se necesita también dicho emisor/receptor.

Los componentes de los que se forma esta tecnología son los siguientes:

- Sensor RFID

(Ilustración 4-6): este dispositivo opera en 915/868 MHz, incluye un sensor de temperatura con una



Ilustración 4-6 Sensor RFID

precisión superior a la que requiere la norma ASTM C1074, una memoria que permite almacenar hasta 10000 registros de temperatura en su memoria y una vida útil de entre 5-10 años dependiendo de la frecuencia de registro y de cómo se programe su

uso. El dispositivo permite ser configurado para encenderse, hacer la lectura, y volver al modo de reposo según requiera la situación.

- El dispositivo de lectura (Ilustración 4-7), que, en caso de no querer depender de un teléfono móvil o Tablet, lleva incluido el emisor-lector



Ilustración 4-7 Dispositivo de lectura

RFID, por lo que únicamente con este dispositivo se pueden obtener todos los resultados.

- Emisor-Lector RFID inalámbrico: en caso de querer prescindir de tener que operar con el dispositivo de



Ilustración 4-8 Emisor-Lector RFID bluetooth

lectura, se ofrece la opción de un emisor-lector RFID, que mediante bluetooth se aparea con el teléfono móvil, Tablet, u otro dispositivo compatible, y proporciona las lecturas que después son interpretadas por el software. En la ilustración 4-8 se muestra el ejemplo de una Tablet y el lector bluetooth.

4.2.3 Caso real: Shimmick Construction

El TransBay Transit Center en San Francisco fue construido por la empresa Shimmick Construction Co. Para este proyecto decidieron utilizar la solución RFID de Wake Inc., en concreto, la HardTrack mobile.

Este proyecto consistió en 16 losetas de hormigón que en su conjunto forman los cimientos de la estructura. Cada loseta debía estar completamente curada previamente al vertido de la siguiente, para evitar fisuras debido al estrés causado por este proceso. Los datos obtenidos por el sistema de Wake Inc. permiten ahorrar tiempo de curado y enfriado.

Según consultoría, se requerían 30 días de curado para cada vertido. Sin embargo, los tiempos del proyecto exigían ir más rápido. Por ello la empresa empezó a buscar soluciones que permitieran obtener el tiempo exacto de curado, acelerando el proceso al máximo.

Una solución cableada no hubiese sido viable en este proyecto, debido a que abarcaba una gran superficie y se trataba de mucho volumen de hormigón y esto hubiese implicado el uso de una gran cantidad de cableado. El uso de la tecnología HardTrack permitió obtener lecturas a diario, mostrarlas en una tabla, además de poder monitorizar varios puntos de una misma loseta y compartir los datos con terceros.

El ingeniero jefe del proyecto, Charlie Marrow, optó por sumergir únicamente el sensor de temperatura en el hormigón, dejando el tag RFID a la vista. Esto le permite reutilizarlo con otro sensor de temperatura una vez la loseta ha finalizado el tiempo de curado.



Ilustración 4-9 Sensores de temperatura en una loseta

También hubo inconvenientes al tomar esta decisión: al no estar los tags diseñados para soportar la lluvia, sino para estar sumergidos en el hormigón, durante los días de lluvia muchas unidades se estropearon.

Los tags alimentados por batería disponen de una memoria de 10.000 bytes, almacenan las lecturas hasta que un operario realiza la lectura. Según Marrow, el rango de lectura es tal que se puede hacer la lectura hasta 50 metros. Una vez hechas las lecturas, se conecta el lector a un pc o portátil y los datos se suben al servidor de la empresa.

En el proyecto se usaron 100 tags RFID, que permitieron ver que el tiempo de curado real para este proyecto era de unas dos semanas (la mitad de lo que se había previsto en consultoría). La duración prevista inicial para finalizar toda la estructura era de 3 años. Según Shimick la inversión se ha amortizado ya 3 o 4 veces, debido a los ahorros de tiempo. En la siguiente fase del proyecto, que consistirá en hacer unos pilares para el puente, se prevé utilizar también esta tecnología.

4.2.4 Conclusiones

Como ventajas de esta tecnología respecto a las existentes en el mercado podemos destacar:

- Posibilidad de toma de decisiones y compartir información en tiempo real.
- Ofrece la posibilidad de adquirir un lector específico para sus productos o de utilizar la nube, por lo que no es imprescindible el uso de un smartphone/Tablet con su aplicación correspondiente.
- En el caso del HardTrack Cloud elimina completamente la necesidad de mano de obra dedicada a hacer estas lecturas en obra. Al ser un sistema basado en la nube permite obtener dichos valores desde cualquier lugar del mundo en cualquier momento.
- Permite, al igual que SmartRock y otros sistemas, verificar la seguridad, evitar costes, etc.

Como inconvenientes a destacar:

- Cableado largo, debido a que cada 4 sondas deben ir conectadas a un dispositivo 3g. En algunos casos genera la necesidad de utilizar cableado muy largo, que puede dar problemas a la hora de ser instalado.

- El factor limitante de no poder utilizar más de 4 sondas por dispositivo 3g también es un inconveniente que destacar, pues rara vez serán suficientes.

5 Estimación del coste de la tecnología “Sensocrete”

Para poder estimar de la forma más precisa posible el coste de esta tecnología (de ahora en adelante, Sensocrete), el primer paso que debemos seguir es definir bien en qué consistirá el producto.

Dividiremos este apartado en 2 subapartados:

- En el primero se justificará el producto mediante la búsqueda de estudios que corroboren la viabilidad de esta tecnología y se situará en el mercado viendo las ventajas que ofrece respecto a la competencia.
- En el segundo se definirán los componentes de esta tecnología y se estimarán los costes.

5.1 Justificación

La tecnología Sensocrete, como principal punto diferenciador respecto a la competencia del mercado, dispone de una vida útil que no se ve limitada por la batería del sensor (dado que se trata de un sensor alimentado inalámbricamente), sino por la vida útil del sensor en sí mismo, estamos hablando virtualmente de una vida útil igual o superior a la de la estructura.

Por ello, hay un valor añadido a este producto respecto a sus competidores del mercado y es el de no solo permitir monitorizar la resistencia del hormigón durante el curado de este, sino que además permite prever fallos de aislamiento térmico en la estructura de forma directa sin coste añadido.

Además, podría servir de indicador indirecto de otras patologías estructurales más severas que afectaran al comportamiento térmico de la estructura (agrietamiento, carbonatación, etc.).

Tal y como se ha mencionado, la característica principal de esta tecnología es que permite ser alimentado de forma inalámbrica. Para ello hay 2 posibles soluciones:

- Un sistema que prescindiera totalmente de la batería como medio de almacenamiento de energía, y se alimente en el momento de la lectura (Khan M. Z. Shams Diciembre 2007).

- Uno que se ayude de una batería para hacer la lectura en el momento que se precise, mediante una antena lectora externa a la cual se transmitirá una potencia importante al sensor (Laheurte 2016).

Por una parte, vemos que se podría prescindir de la batería, pero esto implicaría tener que acercar el lector a la antena cada vez que se requiera hacer una lectura, y esto no es viable, puesto que durante el proceso de curado se requieren lecturas con bastante frecuencia, lo cual implica tener el lector cerca de la antena prácticamente de forma constante.

Es por ello por lo que se propone combinar los dos sistemas en uno que contenga una batería para poder hacer lecturas periódicas, pero que dicha batería se pueda alimentar de forma inalámbrica mediante inducción, tecnología que se utiliza ya actualmente para cargar muchos aparatos electrónicos, tales como cepillos de dientes, smartphones, etc.

Basándonos en el estudio realizado por la universidad de París (Laheurte 2016), podemos extraer una serie de conclusiones que nos ayudarán a definir esta tecnología.

La tecnología UHF RFID es la idónea para la tecnología Sensocrete pues puede usarse de forma pasiva o con muy poca energía si se usa con una batería. En dicho estudio se describe y se analizan los problemas de fabricación y técnicos que conllevan el uso de este tipo de tecnología y como se ve afectado el rango de lectura

en función de los cambios de humedad que se producen en el hormigón. Es importante conocerlo pues, limitará el grosor máximo de la estructura para la cuál será válida esta tecnología.

El tag (etiqueta) utilizado en este estudio ha sido optimizado para ser embebido en el hormigón. Este chip contiene batería, sensor de temperatura, conversor ADC y la interfaz.

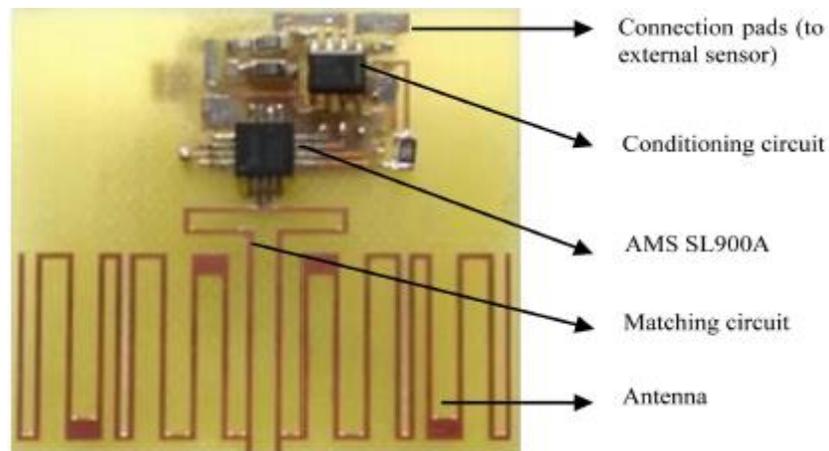


Ilustración 5-1 UHF RFID tag (Laheurte 2016)

Este circuito se protege del hormigón por una caja de Teflón de dimensiones 53 x 53 mm y grosor 3 mm que tiene una abertura para conectar el cableado, dicha abertura está sellada con silicona para evitar la entrada de agua. Además, se puede comunicar con cualquier lector que utilice el protocolo EPC Gen2 Class 3.

Para las simulaciones realizadas en este estudio, utilizaron un bloque de mortero de 12 cm x 12 cm x 16 cm, en el que el sistema se embebió de forma centrada a 5 cm de profundidad. Además, se decide que la huella máxima que podrá tener el tag en el interior del mortero es de 5 cm x 5 cm, que coincide con el tamaño máximo

de agregados que se usa normalmente en la industria de la construcción, por lo que este no afectará a la integridad estructural del elemento a analizar y será lo más fiel posible a la realidad.

La principal diferencia entre el mortero y el hormigón es que el hormigón contiene, además de arena, grava. Esto permite que haya muchas variantes de éste según el tamaño de los áridos añadidos a la mezcla.

En este estudio se decidió utilizar mortero debido a que sus propiedades eléctricas son conocidas y hay mucha más homogeneidad en sus características en general para utilizarlo en laboratorio.

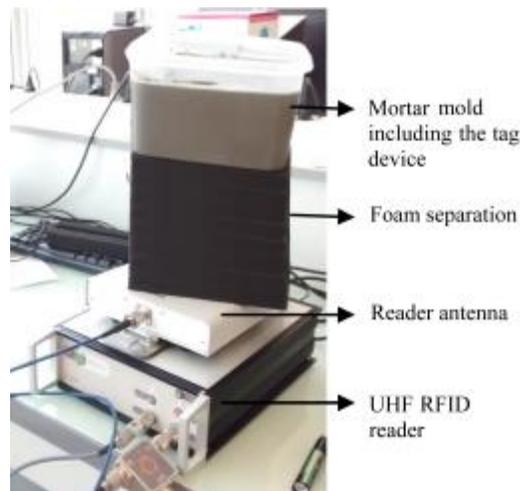


Ilustración 5-2 Banco de pruebas usado para el estudio (Laheurte 2016)

Como vemos en la ilustración, se añade una separación de espuma de 30 cm (las características electromagnéticas de la espuma son similares a las del aire), para asegurarse de que todas las mediciones se hacen a una distancia mayor que la de

interés (en un caso real se podría considerar que el aparato de lectura está en contacto directo con la superficie del hormigón).

A continuación, presentamos los resultados de cómo afectan tanto la permitividad y la conductividad del mortero (ambos valores varían durante el proceso de curado) en el rango de lectura:

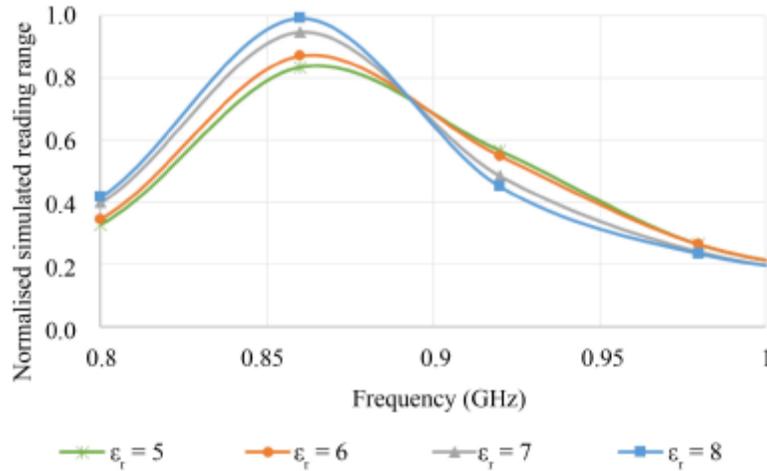


Ilustración 5-3 Rango de lectura normalizado respecto a la frecuencia de la antena para distintas permitividades eléctricas (Laheurte 2016)

En la ilustración 5-3 se representan valores de permitividad relativa entre 5 y 8 (correspondientes con un porcentaje de agua de entre un 2,8% y un 12%), por tanto, podemos dar como válido que este rango representa como afecta la permitividad a la lectura desde que se vierte el mortero hasta que ha finalizado el curado.

En este caso, la antena está bien calibrada y tiene un rango de frecuencia suficientemente amplio para acomodar las variaciones que se producen debido a los cambios en la permitividad eléctrica.

Se obtiene un rango máximo de lectura de 1,55 metros, para 860 MHz y una permitividad relativa de 8. Para una permitividad de 5, que representa una humedad

de 2,8% y por tanto podemos considerar que es la del hormigón curado, el rango de lectura es de aproximadamente 1,3 metros.

En la ilustración 5-4, se representa como afecta la conductividad al rango de lectura, manteniendo una permitividad relativa de 5:

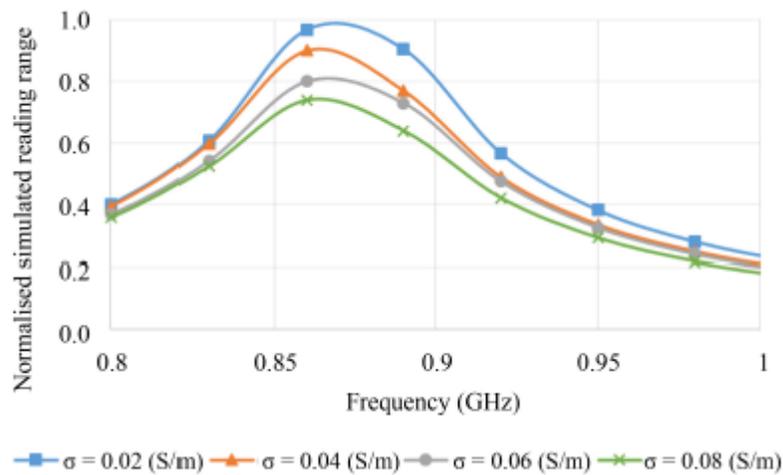


Ilustración 5-4 Rango de lectura normalizado respecto a la frecuencia de la antena para distintas conductividades eléctricas (Laheurte 2016)

En esta ilustración, el rango de lectura esta normalizado a su valor máximo (1,3 metros), y podemos observar que el aumento de la conductividad hace que haya más pérdidas y afecta a la eficiencia de la antena.

Se propone atenuar este problema añadiendo una capa fina de aire que proteja al tag (al añadir una capa fina de aire, disipamos estos efectos pues el conjunto mortero-aire siempre tendrá una conductividad inferior a la del mortero por si solo).

A continuación, se muestran los resultados experimentales mediante los cuales se analiza esta premisa, en los que se ensaya el tag dejando una capa fina de

aire entre el sensor y la caja protectora de Teflón y se compara los resultados con otro que no lo tenga.

Es importante analizar también cómo afecta esta premisa a la frecuencia resonante, no solo al rango de lectura, pues si esta varía mucho la antena dejará de ser eficiente (éstas suelen tener un rango de funcionamiento respecto a la frecuencia bastante limitado).

A continuación, se muestran 2 gráficas en las que se reflejan los resultados de cómo se mueve la frecuencia resonante (ilustración 5-5) y el rango de lectura (ilustración XX):

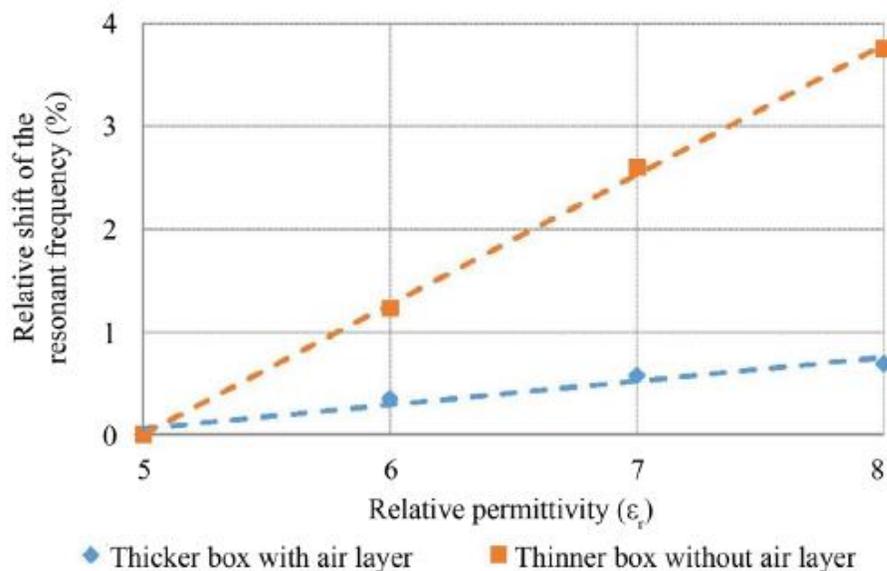


Ilustración 5-5 Cambio relativo de la frecuencia resonante respecto a la permitividad relativa, para una conductividad eléctrica fija de 0,01 S/m

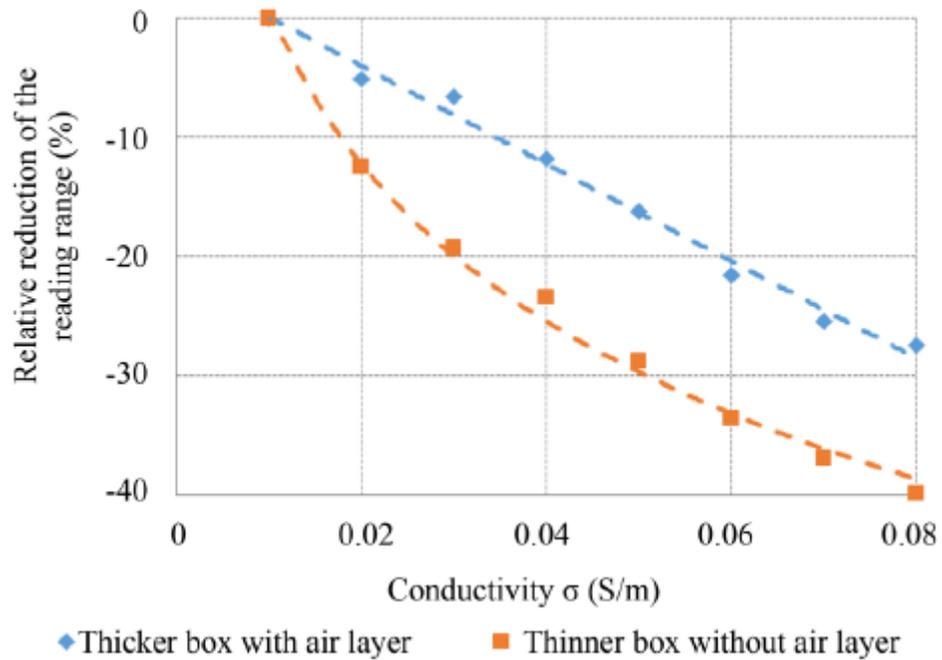


Ilustración 5-6 Decrecimiento relativo del rango de lectura respecto a la conductividad eléctrica para una permitividad relativa fija de 5

Para obtener estos resultados, se hacen mediciones entre 800 y 1000 MHz utilizando el banco de pruebas de la ilustración 5-2 (Voyantic Ltd. Kutojantie 11 s.f.).

Como podemos ver, la adición de una capa de aire es positivo, pues hace que la reducción del rango de lectura respecto a las variaciones de permitividad sea menor y estabiliza la frecuencia resonante respecto a las variaciones de conductividad.

Como conclusión, vemos que es viable desarrollar una tecnología que permita hacer lecturas fiables a lo largo del tiempo en estructuras cuyo espesor no supere 1 metro, y que será necesaria una caja protectora para el sensor cuanto más fina mejor, y con una capa de aire entre esta y el sensor.

5.2 Definición del producto

A continuación, se define de la forma más detallada posible el funcionamiento de esta tecnología:

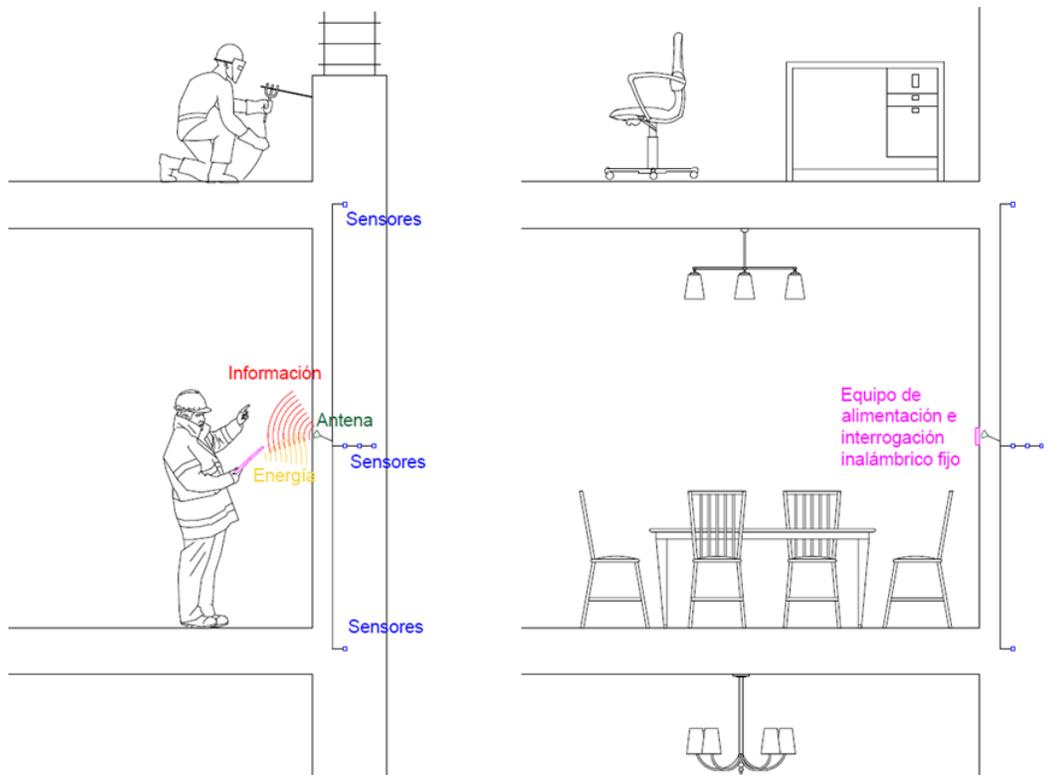


Ilustración 5-7 Croquis de la tecnología en obra (izquierda), y en servicio (derecha). Fuente: Ernest Bernat

Tal y como vemos en la Ilustración 5-7, el sistema consistirá en una serie de sensores situados en los puntos deseados, que mediante un cable irían conectados a un equipo que haría al mismo tiempo de alimentación e interrogación de forma inalámbrica hacia el lector que llevaría el operario, que serviría a la vez de lector y alimentador.

Además, se propone que la unidad controladora deberá tener también algún tipo de batería que elimine la necesidad de estar alimentando constantemente los sensores durante las primeras fases de curado, en las cuales la frecuencia de lectura necesaria es mucho mayor en comparación a las de mantenimiento pasados unos años.

Sensocrete estaría diseñado en un inicio para un grueso máximo de 1 metro, por lo que se podría utilizar de forma efectiva en bloques de viviendas y según que pilares, pero no en estructuras masivas de obra civil tales como presas, etc.

Se plantea para futuros estudios la posibilidad de detección directa de grietas u otros defectos estructurales, pues no está comprobado que se puedan detectar a partir de cambios de temperatura.

A continuación, se muestra, en forma de tabla, los costes estimados para todo el sistema (fuente: Ernest Bernat, UPC):

Producto	Rango de precio
Sensor de temperatura embebido	Entre 1 y 5€
Unidad controladora	Entre 10 y 20€
Unidad de adquisición de datos	Entre 100 y 300€

Como conclusión, debido a todo lo explicado se enfocará el análisis de mercado centrándonos en el sector de la construcción de obra civil: todas aquellas estructuras cuyo espesor es inferior a 1 metro, principalmente viviendas u otro tipo de edificaciones.

6 Análisis de mercado

Tal y como hemos concluido en el apartado anterior, el estudio de mercado se centrará en el sector de la obra civil, dejando de lado estructuras de más de 1 metro de grosor. Para ello, dividiremos esta sección en los siguientes subapartados:

- Estrategia: apartado breve pero necesario en el que definiremos el rumbo del proyecto.
- Información macroeconómica: en este apartado se analizará cómo ha evolucionado el sector de la construcción y obra civil a lo largo de los años, para concluir si es un sector en crecimiento o no, y, por tanto, si esta evolución es favorable a nuestro producto.
- Análisis DAFO: este análisis se compone de:
 - Debilidades: se analizan las debilidades que tiene el producto, concluyendo también en qué se podría mejorar este en el futuro.
 - Amenaza: se debe ver si el mercado está muy saturado, o si la competencia está muy consolidada.
 - Fortaleza: este punto es importante, pues nos dirá qué tiene nuestro producto que no tenga la competencia, y, por tanto, cual es el factor de diferenciación del mismo respecto al resto.
 - Oportunidad: debemos analizar también si hay algún sector del mercado que no está siendo explotado, y si nuestro producto pudiese

encajar en él. Es importante también analizar si se pueden reducir costes.

6.1 Estrategia

Como norma general, cualquier empresa nueva puede optar por dos estrategias posibles:

- Liderazgo en costo: mediante innovaciones ya sean a nivel de producción, nuevos materiales u otras se sitúa como la más barata en el sector, con las ventajas que esto conlleva.
- Diferenciación: con algún punto diferenciador respecto a la competencia que genera un valor añadido al producto que se va a comercializar, y por consecuencia, a la empresa. Por ejemplo, cuando aparecieron las tiendas online, su punto diferenciador era que se podía adquirir productos desde casa sin necesidad de desplazamiento.

En nuestro caso, Sensocrete apuesta por la diferenciación, siendo este producto único en el mercado, pues no existe ningún sistema de sensores para el hormigón que sea alimentado de forma inalámbrica. Esta característica si se combina con unos precios moderados, puede hacer viable el producto.

6.2 Información macroeconómica

A continuación, mostraremos y analizaremos una serie de gráficos obtenidos del IDESCAT, INE, y EUROSTAT los cuales nos ayudarán a detectar como está evolucionando este sector tanto a nivel nacional como europeo, y veremos si la tendencia de esta evolución es favorable o no al desarrollo y comercialización de nuestro producto:

Primeramente, se muestra la relación entre el porcentaje de la construcción sobre el VAB a lo largo de los últimos años:

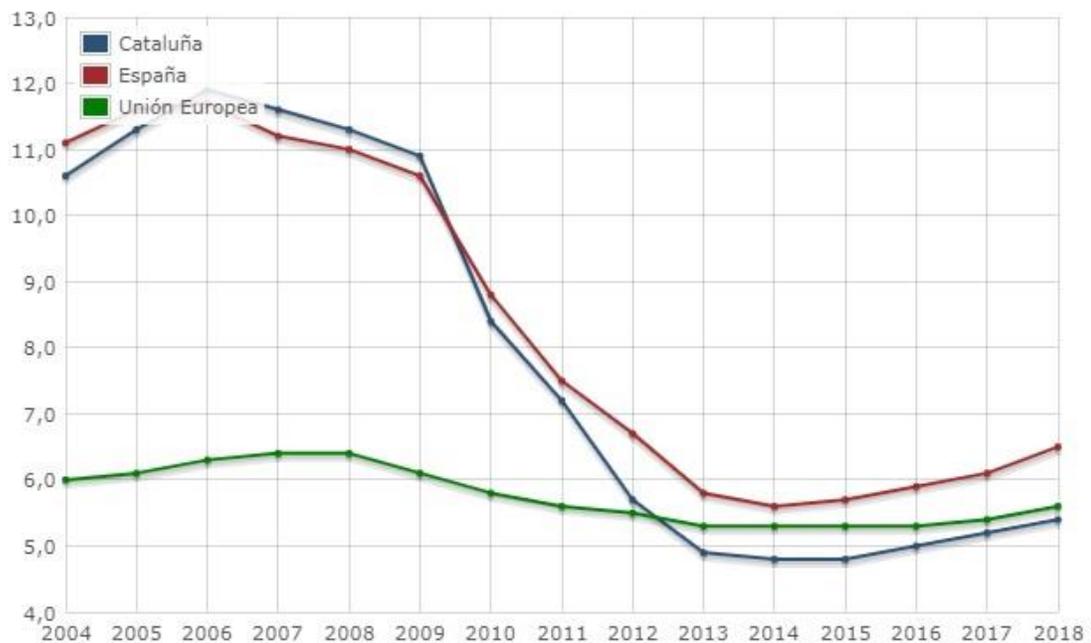


Ilustración 6-1 Porcentaje de la construcción sobre el total del valor añadido bruto. Cataluña, España y Unión Europea (Fuente Cataluña: Idescat, Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat)

Para entender correctamente este gráfico primero debemos definir el VAB: el valor agregado bruto, o valor añadido bruto, va muy relacionado con el producto

interior bruto (PIB). La principal diferencia entre estos dos valores es que en el PIB se incluyen los impuestos indirectos.

A nivel de una empresa, el valor añadido bruto es la diferencia entre el importe de las ventas (grupo 7 del plan general contable) y las compras hechas a otras empresas (grupo 6).

Este concepto es fácil de trasladar a un país entero, pues el VAB de éste sería la suma del valor agregado de todas las empresas de un país.

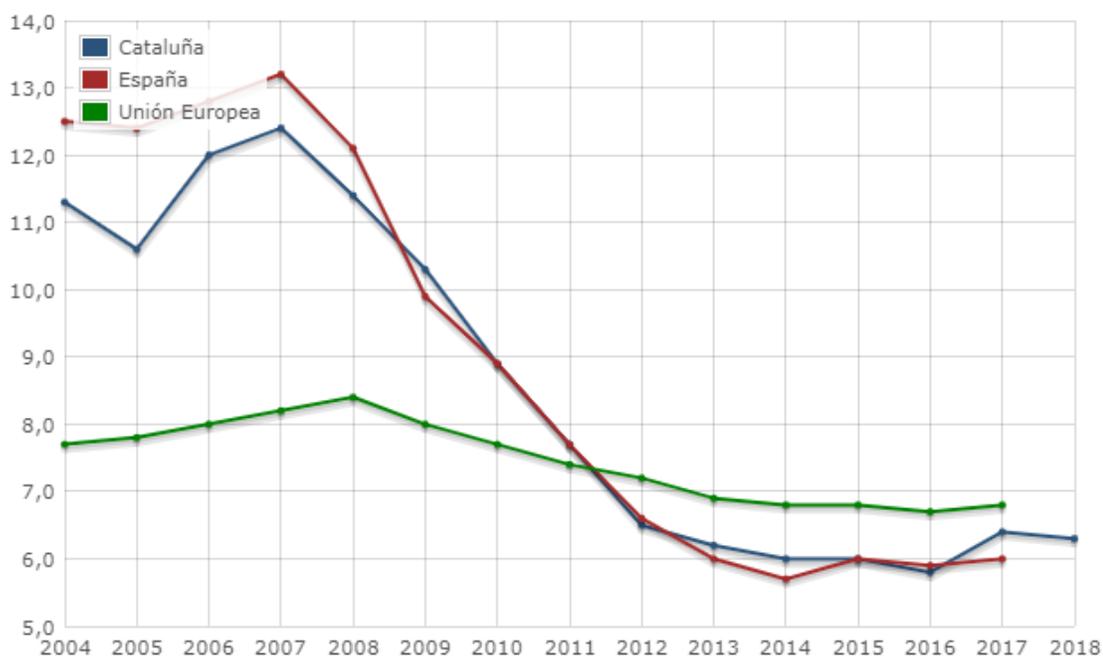
Por tanto, este gráfico nos indica qué porcentaje del total del VAB de la zona de análisis va relacionado con la construcción:

- A nivel europeo, vemos que se ha mantenido más o menos constante desde el año 2004, habiendo alcanzado su máximo en 2007-2008 con aproximadamente un 6,3-6,4%, un mínimo en 2014 de alrededor de un 5,4%, y actualmente está en crecimiento moderado (en 2018 fue aproximadamente del 5,7%).
- A nivel español y catalán, vemos que hubo un gran pico (casi un 12% en 2006-2007) que precedió a la crisis inmobiliaria (2008-2013). Después de esta crisis, el sector se ve estabilizado e incluso muestra una tendencia al alza durante los últimos años.

De este análisis podemos concluir que es positivo para nuestro producto dado que refleja una tendencia de crecimiento en el sector.

Consideramos que también es importante analizar el PIB por habitante, dado que no solo es determinante ver si las empresas están invirtiendo en el sector, sino que además la población tenga poder adquisitivo para comprar, ya que a corto plazo puede que no tenga un impacto, pero sí lo tendrá a largo plazo (crisis del 2008).

Seguidamente, mostraremos un gráfico que indica el porcentaje de población ocupada en el sector de la construcción:



Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat.

Ilustración 6-2 Porcentaje de la población ocupada en construcción. Cataluña, España y Unión Europea. 2004–2018 (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat.)

De este gráfico extraemos las mismas conclusiones que del 6-1: posteriormente a la crisis el sector se ha estabilizado y parece que tiene tendencia a ir recuperándose lentamente.

A continuación, mostramos el PIB por habitante, el PIB por habitante en paridad de poder de compra, y el PIB por persona ocupada en paridad de poder de compra:

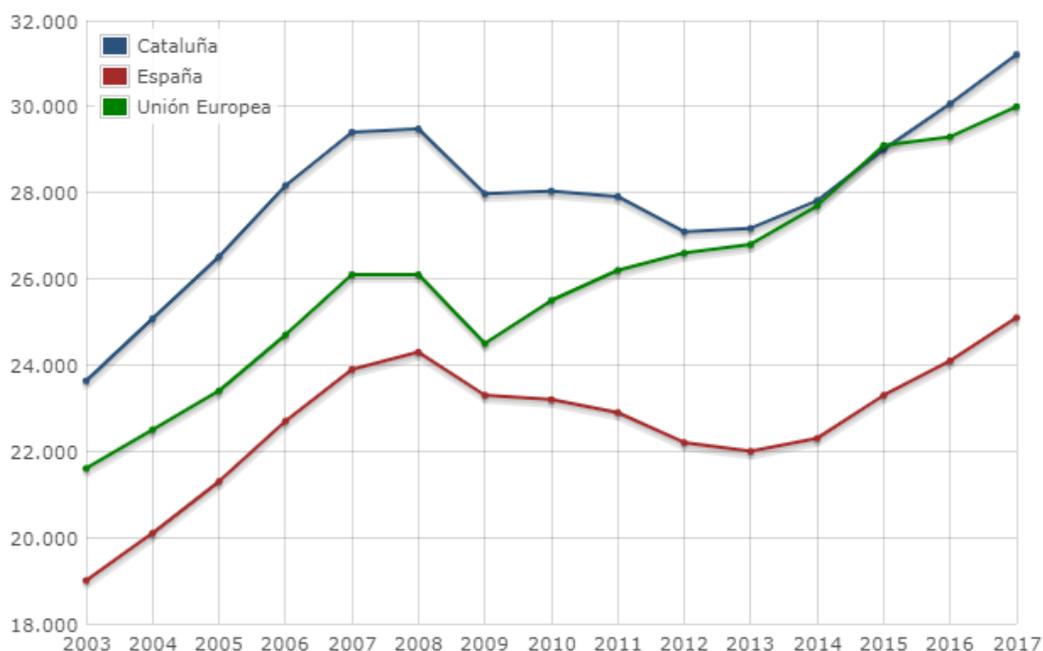


Ilustración 6-3 PIB por habitante. Cataluña, España y Unión Europea (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat)

En esta ilustración (6-3), se representa el PIB por habitante, de forma precisa nos indica cómo está evolucionando el poder adquisitivo de la población de las zonas analizadas. Podemos concluir que, una vez superada la crisis, se detecta una tendencia de crecimiento tanto en Cataluña, como en España, y asimismo en el resto de la Unión Europea.

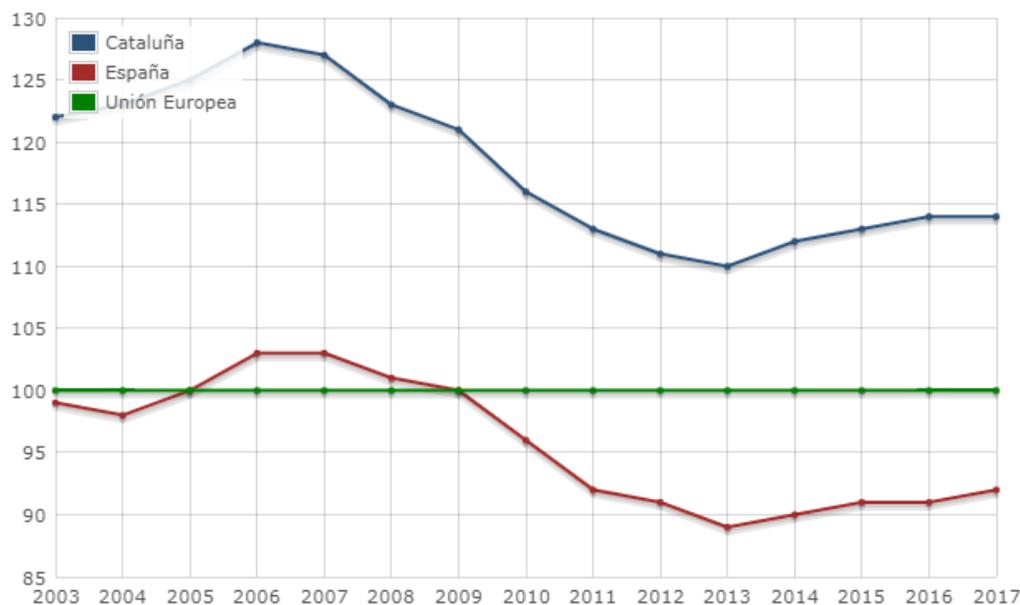
No obstante, hay que tener en cuenta también el PIB por habitante en paridad de poder de compra, que nos indica, además de si hay recursos económicos para los

habitantes de la zona en cuestión, si dichos recursos se corresponden con sus necesidades.

Por ejemplo: en un país concreto puede ser que el PIB por habitante sea mayor que en otro, pero no nos da información sobre el coste de la vida en el lugar en cuestión.

El PIB por habitante en paridad de poder de compra sí que tiene en cuenta este factor, y es importante tenerlo en cuenta pues la población no va a invertir en suelo y/o vivienda si no hay una relación correcta entre el PIB y el coste de la vida.

A continuación, se muestran dos gráficos que representan tanto el PIB por habitante en paridad de poder de compra como el PIB por persona ocupada en paridad de poder de compra:



Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat.

Ilustración 6-4 PIB por habitante en paridad de poder de compra (PPC). Cataluña, España y Unión Europea. 2003–2017 (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat)

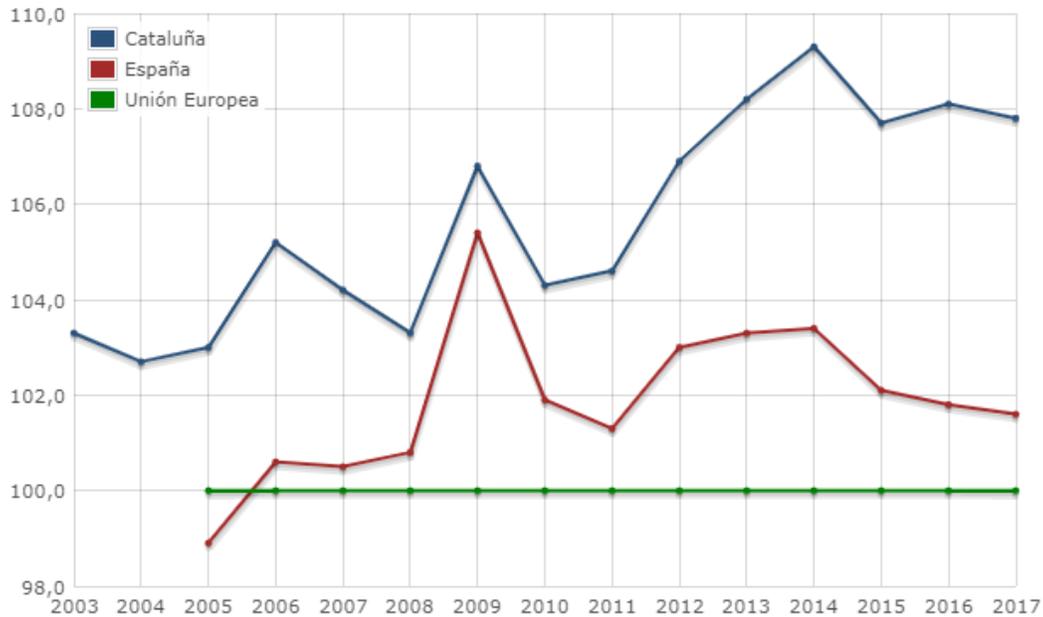


Ilustración 6-5 PIB por persona ocupada en paridad de poder de compra (PPC). Cataluña, España y Unión Europea. 2003–2017 (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat.)

Remarcamos que en estas dos gráficas se hace la comparación con la media de la Unión Europea, podemos concluir:

Si tenemos en cuenta toda la población catalana y/o española, vemos a grandes rasgos que, una vez finalizada la crisis, la tendencia del PIB por habitante en paridad de poder de compra ha ido aumentando, y tiene una tendencia al alza.

Sin embargo, si analizamos el PIB en paridad de poder de compra a nivel de personas ocupadas, es decir con trabajo, vemos que va disminuyendo. Esto es debido probablemente a que muchas familias viven solo con un sueldo, por lo que globalmente están ganando poder adquisitivo, pero las personas que trabajan a nivel individual lo están perdiendo.

Como conclusión respecto al apartado macroeconómico, podemos decir que los resultados son positivos para nuestro producto, pues a pesar de que en la

ilustración 6-5 la tendencia es a la baja, en el resto los resultados han sido favorables:

la economía permite que entren nuevos productos en el sector.

6.3 Análisis DAFO

Este análisis se realiza debido a que aporta mucha información necesaria para un correcto estudio de mercado. Todos los productos, y más este que es nuevo, se desarrollan con un número limitado de recursos: utilizarlos de forma eficiente es clave para el éxito comercial de la tecnología, por ello que es muy importante conocer las fortalezas del producto.

Se analizan también las debilidades del producto, con la finalidad de buscar donde se puede mejorar y evitar comercializar un producto en el que, de haber tenido en cuenta estos factores, podría haberse decidido no hacerlo.

Es importante también analizar las amenazas y/o riesgos que van relacionados con la comercialización y desarrollo del producto. Dado que estos factores no dependen de la empresa, conocerlos de antemano facilitará a la empresa estar preparada para afrontar dicha situación.

Por último, es clave conocer las debilidades del producto a nivel externo, pues es un factor clave para convertirlas en oportunidades para el producto: básicamente hay que potenciar aquellos factores en los que la competencia muestra debilidad.

Antes de hacer la matriz DAFO (en inglés SWOT), debemos dividir dicho análisis en una parte interna y otra externa:

- Análisis interno: en este subapartado se incluyen todas aquellas debilidades y fortalezas que dependen de la empresa, y en las que esta puede influir, posteriormente se definirá una estrategia para corregir estas debilidades y mantener estas fortalezas.
- Análisis externo: aquí se incluyen todas las amenazas y oportunidades que hay en el mercado y que no está en las manos de la empresa, posteriormente se definirá como afrontar estas amenazas, y como explotar estas oportunidades.

6.3.1 Análisis interno

Empezaremos el análisis interno definiendo las debilidades y fortalezas de nuestro producto. A continuación, se empieza por las debilidades del producto:

- **Precio:** a pesar de que el precio encontrado en el apartado 5.2 da unos resultados positivos (es similar o incluso inferior al de la competencia directa), el producto aún no se ha desarrollado, y este precio no deja de ser una mera estimación. Podrían surgir problemas durante el proceso de desarrollo que provocaran incrementos de costes.
- **Falta de estrategia de marketing / información de ventas:** debido a que es un producto nuevo sin desarrollar, no hay información de ventas que pueda ayudar a definir una estrategia de marketing clara para mejorarlas.
- **Imagen de marca inexistente y ausencia de clientela fidelizada:** igual que en el apartado anterior, se trata de un producto pendiente de desarrollo y que no tiene una imagen de marca clara asentada en el mercado.
- **Falta de financiación:** el objetivo de este proyecto es precisamente el de analizar la viabilidad de este producto con la finalidad de encontrar financiación para su desarrollo y comercialización.
- **Cartera de productos limitada:** por ahora únicamente se trata de un producto a comercializar. Siempre es positivo que una empresa cubra distintas necesidades/sectores teniendo más de un producto en su cartera de negocio.

Proseguiremos enumerando y definiendo las fortalezas de este producto:

- **Alta calidad:** esta tecnología estará desarrollada por profesionales cualificados con experiencia en el sector, que conocen todos los factores necesarios para su desarrollo. Además, cumplirá con la norma y los estándares legales requeridos para su comercialización.
- **Diferenciación:** tal y como hemos explicado en el apartado 6.1, la diferenciación respecto a su competencia del mercado es un factor clave a tener en cuenta a la hora de analizar este producto: es único en el mercado entre sus competidores debido a la posibilidad de ser alimentado inalámbricamente.
- **Innovación y mejora constante:** se han propuesto varios factores a desarrollar y mejorar a lo largo del tiempo:
 - Hacer un estudio sobre si se pueden detectar grietas mediante los cambios de temperatura en el interior del hormigón.
 - Mejora de la tecnología UHF utilizada para la transmisión de datos permitiendo mayores espesores de la estructura.
- **Equipo profesional con experiencia:** las personas encargadas del desarrollo de este producto estarán cualificadas para ello.
- **Mejora del servicio** utilizado actualmente en el sector.

6.3.2 Análisis externo

Empezaremos enumerando y definiendo las amenazas con las que se encuentra el producto en el mercado:

- **Innovación tecnológica de la competencia:** tal y como hemos visto en el apartado 4 de este documento, ya hay empresas consolidadas en el sector con tecnologías similares a la analizada: hay un alto riesgo de que una de ellas se adelante, desarrolle un producto similar y lo comercialice.
- **Falta de aceptación en el mercado:** cabe la posibilidad de que, al comercializar el producto, si no hay una estrategia clara de marketing, no tenga la aceptación esperada dado que se trata de una tecnología nueva que no ha sido utilizada.
- **Globalización:** la globalización es un problema, pues quiere decir que potencialmente en cualquier lugar del mundo, una empresa podría desarrollar una idea muy similar que compitiera con la analizada.

Seguimos con las oportunidades:

- **Normativa legal:** la norma que define los estándares y funcionamiento de nuestro producto (ASTM C1074) está consolidada y lleva tiempo siendo utilizada. El hecho de que no sea de reciente creación nos asegura una estabilidad clara a la hora de desarrollar una tecnología que la cumpla.

- **Leyes medioambientales:** vivimos en un mundo donde el ecologismo es un factor a tener en cuenta, cada vez salen más leyes que buscan reducir las emisiones y, en general, se fomenta el medio ambiente. La implantación de nuestro producto reduce las emisiones y la contaminación a la hora de realizar una obra civil.
- **Complementario con otros productos:** esta tecnología podría utilizarse no solo para medir la resistencia de la estructura, sino que también podría complementar a sistemas de climatización donde se requiera una precisión muy elevada en cuanto a temperatura en el interior del edificio.
- **Utilización de nuevos canales de venta:** hoy en día es muy fácil, con una estrategia de marketing digital adecuada, introducirse en la venta online.
- **Rápida evolución tecnológica:** cada día se desarrollan nuevas tecnologías con más rapidez: estar atento a cómo evolucionan las empresas de sensores/antenas puede ser clave para la mejora del producto.

6.3.3 Matriz DAFO

Una vez realizados los análisis interno y externo, se procede a elaborar la matriz DAFO, que muestra de forma gráfica y resumida toda esta información:

DAFO	Positivo	Negativo
Interno	<p>Fortalezas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta calidad. • Diferenciación • Innovación y mejora constante • Equipo profesional con experiencia • Mejora del servicio utilizado actualmente 	<p>Debilidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Precio • Falta de estrategia de marketing • Imagen de marca inexistente • Ausencia de clientela fidelizada • Falta de financiación • Cartera de productos limitada
Externo	<p>Oportunidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normativa legal • Leyes medioambientales • Complementario a otros productos • Nuevos canales de venta • Rápida evolución tecnológica 	<p>Amenazas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Innovación tecnológica de la competencia • Falta de aceptación en el mercado • Globalización

7 Estrategia de futuro: CAMO (Corregir – Afrontar – Mantener – Explorar)

A partir de la matriz DAFO, ya podemos extraer conclusiones sobre si es viable el desarrollo y comercialización del producto. Dichas conclusiones se explican en el apartado correspondiente.

Sin embargo, se ha querido ir más allá, ampliando dicho análisis y definiendo las acciones a tomar a partir de los resultados en el futuro para asegurar la persistencia del producto en el mercado.

De forma detallada, definiremos acciones para:

- **Corregir las debilidades:** hay que buscar corregirlas, o bien hacer que dejen de afectarnos negativamente.
- **Afrontar las amenazas:** debemos evitar que dichas amenazas acaben siendo debilidades.
- **Mantener las fortalezas:** este es el punto fuerte de nuestro producto, y deberá seguir siéndolo a lo largo del tiempo.
- **Explorar las oportunidades:** se deberán crear estrategias para convertir las oportunidades en futuras fortalezas.

7.1 Corregir las debilidades

Podemos dividir las debilidades del producto en dos grupos:

En el primer grupo, encontramos el precio y la ausencia de clientela fidelizada. Respecto a estas dos debilidades, no se propone ninguna corrección, pues probablemente se corrijan al desarrollar y comercializar el producto.

También encontraríamos la falta de financiación, pues la finalidad de este proyecto es hacer un análisis de mercado con el que obtener conclusiones que ayuden a obtenerla.

En el segundo grupo, encontramos el resto, para las que sí que se proponen correcciones:

- **Falta de estrategia de marketing e imagen de marca inexistente:** se propone previamente a la comercialización del producto, diseñar una imagen corporativa y una estrategia de marketing online para situar el producto en el mercado lo más rápido posible.
- **Cartera de productos limitada:** no se debería depender únicamente de un producto para entrar en el mercado. Se propone crear algún otro tipo de tecnología que lo complemente: por ejemplo, se podría desarrollar un sistema que permita utilizarlo en sistemas de climatización donde haya unos requisitos de precisión muy altos.

7.2 Afrontar las amenazas

Según la matriz DAFO este producto se encuentra con tres amenazas principales, las cuales se deberían afrontar de la siguiente forma:

- Para evitar que la competencia se nos adelante, habría que intentar implantarlo y desarrollarlo lo antes posible, patentándolo con la mayor brevedad posible para tener la propiedad intelectual de esta tecnología.
- Al ser un producto nuevo, probablemente muchos constructores sean reticentes a utilizarlo. La estrategia de marketing debería tener esta reticencia en cuenta e incentivar/motivar a los posibles compradores a hacer una primera prueba del producto.
- **Globalización:** el correcto afrontamiento de esta amenaza va también ligado al marketing, es principalmente por este motivo que se propone una estrategia de marketing digital que abarque el máximo de público posible.

7.3 Mantener las fortalezas

En nuestro caso, las fortalezas son el punto más fuerte de nuestro producto, por tanto, es muy importante mantenerlas:

- **La alta calidad del producto** ha de ser siempre una de las premisas a mantener, asegurándose de que haya un control de calidad acorde en la producción del producto y tomando las medidas necesarias para que siempre sea así.
- **Diferenciación:** se trata de un producto único en el mercado.
- **Innovación y mejora constante:** tal y como se ha propuesto previamente, una vez comercializado el producto, se debe seguir innovando y desarrollando en los factores propuestos: aumentar el rango de lectura e intentar desarrollar la tecnología que permita detectar grietas de forma indirecta.
- **Equipo profesional con experiencia y mejora del servicio utilizado actualmente:** siempre se deberá mantener trabajadores altamente cualificados para el desarrollo del producto y buscar mejorar la situación actual del sector.

7.4 Explorar las oportunidades

Este apartado no es crítico para nuestro producto, pero tiene algunos detalles que pueden ser de mucho interés para el futuro de la tecnología:

- **Normativa legal:** en caso de que se produzca algún cambio en la normativa, se deberá adaptar la tecnología de la forma más rápida posible a los cambios legales pertinentes.
- **Leyes medioambientales:** se deberá buscar siempre reducir emisiones, y, en general, ser lo más sostenibles medioambientalmente hablando.
- **Complementario a otros productos:** el uso del sensor para climatización es un factor a tener en cuenta en un futuro cercano, pues puede tener ciertas aplicaciones potencialmente interesantes.
- **Nuevos canales de venta y rápida evolución tecnológica:** al igual que con la normativa legal, es crucial estar siempre al día tanto en relación a nuevos canales de venta como a la implantación de novedades tecnológicas.

7.5 Estrategia

Según este análisis, la empresa puede tomar distintas estrategias para su proyección de futuro:

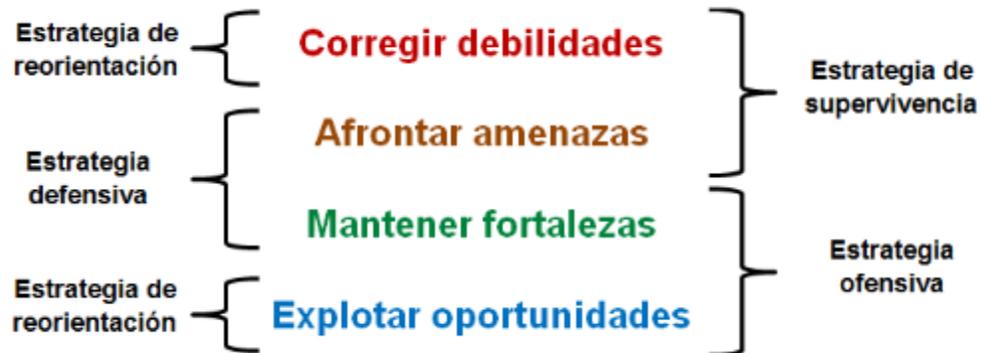


Ilustración 7-1 Estrategias empresariales que derivan del análisis CAMO

Estas estrategias se pueden englobar en los siguientes grupos:

- **Estrategias defensivas:** buscan evitar que empeore la situación de la empresa. Se centran en afrontar amenazas y mantener fortalezas.
- **Estrategias ofensivas:** buscan mejorar la situación actual. Se centran en explotar las oportunidades y en mantener/reforzar las fortalezas.
- **Estrategias de reorientación:** buscan transformar la situación, corrigiendo debilidades y explotando oportunidades.
- **Estrategias de supervivencia:** buscan corregir debilidades y afrontar amenazas.

En nuestro caso, se propone una estrategia que sea mayoritariamente ofensiva, buscando explotar las oportunidades que ofrece este producto debido

principalmente a su diferenciación (es único), sin dejar de lado la parte defensiva en la que se busca mantener las fortalezas de dicho producto.

Para nada consideramos que se haya de utilizar una estrategia de reorientación o supervivencia, pues no tendría sentido en esta tecnología que además de ser nueva, es viable.

8 Conclusiones generales

La realización de este estudio ha permitido recabar información con el fin de obtener una imagen clara de la situación del mercado de sensores para monitorizar la resistencia del hormigón.

Se ha iniciado el proyecto analizando el marco legal, viendo que hay una norma que establece como utilizar sensores para obtener la resistencia del hormigón, y además está consolidado, pues lleva bastante tiempo siendo utilizado por otros productos. Esto es positivo pues nos marca de forma clara como ha de funcionar esta tecnología.

Seguidamente hemos visto que muchas empresas siguen utilizando los métodos tradicionales (ensayos destructivos) en obra civil, con lo que destacamos que es un nicho de mercado con alto potencial para nuestro producto. Además, la mayoría de las empresas que desarrollan productos similares están en Estados Unidos.

Hemos apreciado que el uso de estos métodos más tradicionales conlleva gran dificultad logística y unos altos costes, pues intervienen muchísimos factores a tener en cuenta, requiriendo además la intervención de mucho personal.

Por otra parte, se han analizado casos reales de empresas que comercializan productos similares, y los resultados han sido muy positivos: en todas estas obras

donde se ha aplicado la tecnología, no solo se ha producido un ahorro económico sino también de tiempo, llegando a acelerar de forma notable el proceso de construcción.

Asimismo, hemos definido de forma clara como deberá ser el producto, con la estimación de su coste, y proponiendo futuras mejoras que permitirán al producto continuar evolucionando para su uso en otras áreas tales y como climatización y mantenimiento de estructuras.

Por último, en el análisis de mercado, se ha visto que los factores macroeconómicos son favorables a la comercialización del producto, y además se han analizado sus debilidades y fortalezas, así como las amenazas y oportunidades que ofrece a nivel externo. Los resultados han sido favorables, permitiendo incluso definir una estrategia de negocio para seguir creciendo y evolucionando a posteriori de la comercialización del producto.

No obstante, no hay que dejar de lado las amenazas y debilidades, pues algunas de ellas tales como la inexistencia de imagen de marca, la falta de una estrategia de marketing definida y la posible innovación tecnológica de la competencia pueden llegar a suponer un riesgo.

En conclusión, los resultados se valoran como favorables, viendo que hay mercado para el producto, y que merece la pena comercializarlo para obra civil en estructuras que cumplan con sus requisitos, pero sin dejar de tener en cuenta las amenazas y debilidades mencionadas: inexistencia de imagen de marca, falta de una

estrategia de marketing definida y posible innovación tecnológica por parte de la competencia.

9 Tabla de ilustraciones

Ilustración 2-1 Esquema soporte superior	19
Ilustración 2-2 Ejemplo de relación entre resistencia y factor temperatura tiempo	33
Ilustración 2-3 Ejemplo de relación entre resistencia i temperatura equivalente a 20 ° C	34
Ilustración 2-4 Inverso de la resistencia vs. inverso de la edad menos el tiempo de fraguado.	38
Ilustración 2-5 Constante K vs. Temperatura de curado	38
Ilustración 3-1 Cono de Abrams.....	43
Ilustración 3-2 Mesa de sacudidas.....	46
Ilustración 3-3 Molde para mesa de sacudidas	47
Ilustración 3-4 Maza de apisonar	47
Ilustración 3-5 Medida del esparcimiento	49
Ilustración 3-6 Consistómetro Vebe (medidas en mm)	50
Ilustración 3-7 Formas de asentamiento	53
Ilustración 3-8 Ciclo de fabricación del hormigón preparado y responsabilidades	57
Ilustración 3-9 Efecto de curado en la resistencia (CSTR N° 11)	72

Ilustración 3-10 Coeficientes de conversión del hormigón por edad.....	73
Ilustración 3-11 Camara de curado.....	77
Ilustración 3-12 Costes de un ensayo de hormigón.....	79
Ilustración 4-1 SmartRock 2	85
Ilustración 4-2 Esquema de conexión SmartRock2.....	86
Ilustración 4-3 Esquema de conexión sonda SmartRock2	87
Ilustración 4-4 Plataforma de hormigón postensado	91
Ilustración 4-5 HardTrack Cloud.....	99
Ilustración 4-6 Sensor RFID	101
Ilustración 4-7 Dispositivo de lectura.....	102
Ilustración 4-8 Emisor-Lector RFID bluetooth.....	102
Ilustración 4-9 Sensores de temperatura en una loseta.....	104
Ilustración 5-1 UHF RFID tag (Laheurte 2016)	110
Ilustración 5-2 Banco de pruebas usado para el estudio (Laheurte 2016)...	111
Ilustración 5-3 Rango de lectura normalizado respecto a la frecuencia de la antena para distintas permitividades eléctricas (Laheurte 2016)	113
Ilustración 5-4 Rango de lectura normalizado respecto a la frecuencia de la antena para distintas conductividades eléctricas (Laheurte 2016)	114

Ilustración 5-5 Cambio relativo de la frecuencia resonante respecto a la permitividad relativa, para una conductividad eléctrica fija de 0,01 S/m	115
Ilustración 5-6 Decrecimiento relativo del rango de lectura respecto a la conductividad eléctrica para una permitividad relativa fija de 5	116
Ilustración 5-7 Croquis de la tecnología en obra (izquierda), y en servicio (derecha). Fuente: Ernest Bernat.....	117
Ilustración 6-1 Porcentaje de la construcción sobre el total del valor añadido bruto. Cataluña, España y Unión Europea (Fuente Cataluña: Idescat, Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat	123
Ilustración 6-2 Porcentaje de la población ocupada en construcción. Cataluña, España y Unión Europea. 2004–2018 (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat.)	125
Ilustración 6-3 PIB por habitante. Cataluña, España y Unión Europea (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat)	126
Ilustración 6-4 PIB por habitante en paridad de poder de compra (PPC). Cataluña, España y Unión Europea. 2003–2017 (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat)	127
Ilustración 6-5 PIB por persona ocupada en paridad de poder de compra (PPC). Cataluña, España y Unión Europea. 2003–2017 (Fuente Cataluña: Idescat. Fuente España, zona euro y Unión Europea: Eurostat.)	128

Ilustración 7-1 Estrategias empresariales que derivan del análisis CAMO... 142

10 Bibliografía

«53.» *Concrete Society Technical Report*, s.f.

AENOR. «Ensayos de hormigón fresco Parte 1: Toma de muestras.» *UNE-EN 12350-1*.

2009.

—. «Ensayos de hormigón fresco Parte 3: Ensayo Vebe.» *UNE-EN 12350-3*. 2006.

—. «Ensayos de hormigón fresco Parte 5: Ensayo en la mesa de sacudidas.» *UNE-EN*

12350-5. 2006.

Bungey, J.H. «Determining concrete strength by using small diameter cores.»

Concrete Research, 31, 1979: 91-98.

Col·legi d'Arquitectes de Catalunya. 12 de 2018. <https://arquitectes.cat/es>.

Construmatica. s.f. www.construmatica.com (último acceso: diciembre de 2018).

EUROSTAT. s.f. <https://ec.europa.eu/>.

Giatec Scientific. s.f. www.giatecscientific.com (último acceso: marzo de 2019).

Instituto de Estadística de Cataluña. s.f. <https://www.idescat.cat/>.

Instituto Nacional de Estadística. s.f. <https://www.ine.es/>.

Izquierdo, Patricia Aragón. *Análisis de los costes realizados en laboratorios de control de edificación sobre hormigón y acero*. TFC, Valencia: UPV, 2001.

J. Akasaki, M. Moraes, C. Silva, C. Fioriti, Mauro. Tashima. «Evaluación del concepto de madurez en el hormigón con adición de cenizas de cascarilla de arroz.» *Ingeniería de construcción* , 2016.

Khan M. Z. Shams, Student Member, IEEE, and Mohammad Ali, Senior Member, IEEE. «Wireless Power Transmission to a Buried Sensor in Concrete.» *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 12, Diciembre 2007.

Laheurte, J.-M., Kabalan, A., Retima, H., Piedallu, E., Michelis, F. and Lebental, B. «Embedded UHF RFID Tag for Durability Monitoring in Concrete.» *Wireless Sensor Network*. Vol. 8. Marne-la-Vallée, 2016.

Ministerio de Fomento. «Instrucción de Hormigón Estructural.» *EHE-08*. 2011.

Neville, A.M. «Properties of Concrete, Longman, Harlow.» 1995.

Proetisa. abril de 2019. <http://proetisa.com/>.

Revuelta Crespo, D., Gutiérrez Jiménez, J.P. «Estimación de la resistencia a compresión del hormigón mediante el muestreo, extracción y rotura de probetas testigo.» Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid, España., s.f.

«SmartRock2™ User Guide.» Giatec Scientific Inc., marzo de 2019.

«Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.» *ASTM*

C1074. 10 de Noviembre de 1998.

«Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.»

ASTM C39. 3 de Marzo de 2014.

The Concrete Society. s.f. <http://www.concrete.org.uk/>.

Universidad de La Laguna. «Ensayos de hormigón fresco: ensayo Vebe. .» De E. y

Alloza, A.M. González. s.f.

Voyantic Ltd. Kutojantie 11, FI-02630 Espoo, Finland. s.f.

Wade, Samuel Allen. «Evaluation of the maturity method to estimate concrete

strength.» Auburn, 16 de Diciembre de 2016.

Wake Inc. Abril de 2019. www.wakeinc.com.