

Universidad de Zaragoza  
Centro Politécnico Superior



Proyecto Fin de Carrera

# Desarrollo y aplicación de un método automatizado para el análisis de datos de un dispositivo de monitorización continua de la hidratación de mortero y hormigón mediante señales de ultrasonidos de banda ancha

Aitor Arizcuren Salinas

Marzo 2011



Departamento de Construcciones  
y Materiales

Real Academia Militar de Bélgica

Director: Bram Desmet



Departamento de Ciencia y  
Tecnología de Materiales y Fluidos

Universidad de Zaragoza

Ponente: Dr. José Ignacio Peña Torre



# Desarrollo y aplicación de un método automatizado para el análisis de datos de un dispositivo de monitorización continua de la hidratación de mortero y hormigón mediante señales de ultrasonidos de banda ancha

## Resumen

---

El presente proyecto se incluye en la línea de investigación sobre el estudio y control de la reología del hormigón constituido por plastificantes y aceleradores o retardadores simultáneamente, en el que participa la Real Academia Militar de Bélgica. El objetivo del proyecto general de investigación es dominar y controlar la influencia de los diferentes componentes en el hormigón y en su reología, y cómo evoluciona con el tiempo cuando se usan diferentes combinaciones de aditivos. El programa está centrado principalmente en hormigón autocompactante, ya que en él se combina normalmente estos aditivos.

En este contexto, el Departamento de Construcción y Materiales de la Real Academia Militar de Bélgica ha trabajado en los últimos años en la caracterización de diferentes morteros autocompactantes tanto por medio de ensayos tradicionales, así como por monitorización continua con ultrasonidos. Mediante estas técnicas de ultrasonidos, las propiedades del mortero pueden ser medidas de manera no destructiva, reproducible y objetiva. La técnica está basada en el estudio y observación de las ondas longitudinales transmitidas a través del compuesto durante el proceso de hidratación del cemento. Una de las maneras de determinar el fraguado inicial del hormigón y mortero es mediante la determinación del punto de inflexión de la curva de velocidad de la onda ultrasónica longitudinal.

El tratamiento de datos de uno de los dispositivos de monitorización por ultrasonidos, llamado Freshcon, es problemático, sobre todo en las primeras horas de vida del mortero. En este periodo de tiempo los niveles de ruido son superiores o similares a la señal recibida y la forma, amplitud, y espectro frecuencial de la señal cambian rápidamente, hechos que impiden una correcta obtención de la curva de velocidad de la onda longitudinal.

El objetivo de este proyecto es el desarrollo y aplicación de un método automatizado para el tratamiento de las señales registradas por Freshcon para la obtención de curvas de velocidad de la onda longitudinal para morteros y hormigones. En este proyecto se ha estudiado las señales de ultrasonido recibidas por Freshcon durante un ensayo de ultrasonidos y el algoritmo de detección del tiempo de llegada de la señal. Tras este estudio, se ha desarrollado un método automatizado para el tratamiento de las señales ultrasónicas mediante filtros discretos de tipo Bessel para la obtención de curvas de velocidad de la onda longitudinal. La validez del método desarrollado ha sido probada y este ha sido aplicado en los resultados de un programa experimental sobre mortero autocompactante.



# Agradecimientos

---

*Deseo expresar mi gratitud a todas las personas que por su apoyo e interés han hecho posible la realización de este proyecto y a todos aquellos que me dieron consejos durante su realización.*

*Deseo agradecer al director de este proyecto Bram Desmet y a John Vantomme la confianza depositada en mí al permitirme desarrollar este proyecto en la Real Academia Militar de Bélgica y por su ayuda e interés mostrado en todo momento. Del mismo modo deseo expresar mi gratitud a todos los componentes del Departamento de Construcción y Materiales por su agradable compañía y su amabilidad.*

*También quería agradecer a José Ignacio Peña, ponente, por su disponibilidad, apoyo y colaboración.*

*A mis padres y mi familia, por su apoyo incondicional, todo su cariño y su confianza.*

*Finalmente, gracias a Elena y todos mis amigos por estar ahí siempre que os he necesitado, por escucharme y ayudarme y por los buenos momentos que hemos vivido juntos.*

*Muchas gracias a todos.*



# Índice

---

## Parte I: Memoria

1.	Introducción .....	15
2.	Test de ultrasonidos para el estudio de la hidratación del cemento en hormigón .....	17
2.1.	Hidratación del cemento portland .....	17
2.2.	Técnicas de ultrasonidos .....	19
2.3.	Curva de velocidad de la onda longitudinal .....	20
3.	Hormigón auto-compactante .....	22
3.1.	Aspectos generales.....	22
3.2.	Superplastificantes: polímeros de policarboxilatos de éter.....	22
3.3.	Aditivos minerales: cenizas volantes.....	23
4.	Estudio del tratamiento inicial de datos del dispositivo de ultrasonidos .....	25
4.1.	Descripción general.....	25
4.2.	Señal emitida.....	25
4.3.	Señal recibida .....	26
4.4.	Detección del tiempo de llegada de la señal.....	28
4.5.	Punto de partida.....	29
5.	Desarrollo de un método para el tratamiento de datos .....	31
5.1.	Introducción .....	31
5.2.	Esquema general de funcionamiento .....	31
5.3.	Cálculo de la frecuencia de corte del filtro .....	33
5.4.	Filtro tipo Bessel.....	34
5.5.	Señales compuestas .....	35
5.6.	Cálculo de retraso producido en el filtro .....	36
5.7.	Tratamiento tras filtrado.....	37
5.8.	Cálculo de la curva de velocidad .....	37
5.9.	Corrección de la curva de velocidad .....	38
5.10.	Resultados .....	39
5.11.	Obtención del punto de inflexión del la curva de velocidad.....	40
6.	Aplicación del método desarrollado en el estudio de mortero auto-compactante .....	42
6.1.	Ensayos realizados.....	42
6.2.	Influencia de la variación de la cantidad de Glenium 51 .....	42

6.3	Influencia de la variación de la cantidad de cenizas volantes.....	43
7.	Conclusiones.....	45

## Parte II: Anexos

Anexo A .....	49
A. Hormigón.....	51
A.1 Cemento portland .....	51
A.1.1 Generalidades .....	51
A.1.2 Composición química .....	51
A.1.3 Composición potencial.....	52
A.1.4 Características físicas y mecánicas .....	52
A.2 Agua, áridos y aditivos .....	54
A.2.1 Agua de amasado y de curado .....	54
A.2.2 Áridos .....	54
A.2.3 Aditivos.....	54
A.3 Hidratación.....	56
A.3.1 Calor de hidratación .....	56
A.3.2 Reacciones químicas .....	56
A.3.3 Proceso físico.....	57
Anexo B .....	59
B. Algoritmo AIC .....	61
B.1 Introducción .....	61
B.2 Transformada Hilbert de la señal .....	61
B.3 Función AIC.....	62
Anexo C .....	65
C. Analysis of the previous data treatment of Freshcon.....	67
C.1 Freshcon .....	67
C.2 Emitted signal.....	68
C.3 Received signal .....	68
C.4 Determination of the US signal's onset time .....	75
C.4.1 Introduction.....	75



C.4.2	Wavelet transform .....	75
C.4.3	AIC picker.....	76
C.5	Starting point: Determination of raw signal's onset time with AIC picker algorithm.	77
C.6	Trigger problems .....	79
C.7	Noise/signal rate problems .....	80
C.8	Other problems .....	82
Anexo D	.....	83
D.	Automatized method for the Freshcon data treatment .....	85
D.1	General description.....	85
D.2	Cut-off frequency calculation.....	87
D.3	Bessel filter.....	93
D.4	Grouped signal calculation.....	94
D.5	Cross correlation .....	97
D.6	Post-filtering treatment .....	99
D.7	Freshcon offline.....	104
D.8	Velocity correction .....	104
D.9	Checking of the obtained results .....	105
Anexo E	.....	107
E.	Ensayos realizados.....	109
E.1	Ensayos sobre mortero auto-compactante en estado fresco.....	109
E.1.1	Tipos de ensayo realizados.....	109
E.1.2	Ensayos de consistencia .....	110
E.1.3	Ensayos de contenido en aire .....	110
E.1.4	Ensayos de densidad .....	111
E.2	Resultados de los ensayos realizados .....	112
E.2.1	Influencia de la variación de la cantidad de Glenium 51 .....	112
E.2.2	Influencia de la variación de cenizas volantes .....	115
E.2.3	Influencia de la variación de la cantidad de Glenium 27 .....	118
Anexo F	.....	121
F.	Código en Matlab para el tratamiento de datos.....	123

F.1	Freshcon data treatment .....	123
F.2	Grouping.....	128
F.3	Createfilter .....	129
F.4	Postfilter .....	130
F.5	Modelo de filtro Bessel .....	131
	Índice de figuras .....	133
	Índice de tablas .....	137
	Bibliografía .....	139

# Lista de símbolos y acrónimos

---

%SP: Porcentaje de superplastificante en peso con respecto a la cantidad de cemento en hormigón y mortero

A/C: Relación Áridos/Cemento en hormigón y mortero

AIC: Criterio de información de Akaike (Akaike Information Criterion)

C/P: Relación Cemento/Polvo(cemento + adiciones minerales) en hormigón y mortero

PCE: Polímeros de polycarboxilato de éter

SCC: Hormigón auto-compactante (Self-Compacting Concrete)

SCM: Mortero auto-compactante (Self-Compacting Mortar)

SP: Superplastificante

Tc: Edad del hormigón o mortero

Ts: Escala de tiempo de una señal individual

US: Ultrasonidos o ultrasónico

W/C: Relación Agua/Cemento (Water/Cement) en hormigón y mortero



# Parte I: Memoria

---

Desarrollo y aplicación de un método automatizado para el análisis de datos de un dispositivo de monitorización continua de la hidratación de mortero y hormigón mediante señales de ultrasonidos de banda ancha



# 1. Introducción

---

El hormigón autocompactante (SCC, en inglés Self-Compacting Concrete) se ha descrito como la aplicación más revolucionaria en el campo de la construcción con hormigón en las últimas décadas. Combina las buenas propiedades del hormigón endurecido con una alta fluidez y la estabilidad en estado fresco. Como consecuencia, el SCC no requiere de vibración para su completa compactación, y permite una construcción más rápida, fácil y segura, una reducción de mano de obra, una mayor durabilidad y un mejor acabado superficial, una reducción en las secciones y una mayor libertad en el diseño [1]. Para obtener estas propiedades, el SCC contiene algunos aditivos químicos como superplastificantes (SP) y adiciones de hormigón.

Este proyecto fin de carrera está englobado en un proyecto de investigación sobre el estudio y control de la reología del hormigón constituido por plastificantes y aceleradores o retardadores simultáneamente en el que participan la Universidad de Gante, la Universidad Católica de Lovaina y la Real Academia Militar de Bélgica. La reología describe como el hormigón fluye y es una característica muy importante a tener en cuenta en el bombeo del hormigón. La reología está fuertemente influenciada por los componentes del hormigón, y es variable en el tiempo durante la hidratación de la mezcla. El objetivo de proyecto de investigación general es dominar y controlar la influencia de los diferentes componentes en el hormigón y en su reología, y como la reología evoluciona con el tiempo cuando se utilizan diferentes combinaciones de aditivos. La influencia en la reología de los distintos aditivos individualmente es normalmente conocida, pero no la interacción de la influencia de varios aditivos en la reología del hormigón. La investigación se centra en SCC, ya que la combinación de varios aditivos es frecuente.

Por el momento el programa de investigación está en una fase preparatoria: diferentes adiciones minerales y SP que son parte del proceso de selección están siendo sometidos a series de ensayos, ya que es necesario determinar qué composiciones van a ser estudiadas en detalle posteriormente. En la segunda fase, retardadores y aceleradores serán estudiados, y en una tercera fase la reología de las mezclas seleccionadas en las que se combinen SP y aceleradores o retardadores será investigada.

En este contexto, el Departamento de Construcción y Materiales de la Real Academia Militar de Bélgica ha trabajado en los últimos años en la caracterización de diferentes morteros autocompactantes (SCM, en inglés Self-Compacting Mortar) y SCC por medio de ensayos tradicionales (fluidez y consistencia, densidad y contenido de aire), así como por monitorización continua mediante ultrasonidos (US). Mediante estas técnicas de US, las propiedades del mortero pueden ser medidas de manera no destructiva, reproducible y objetiva. La técnica está basada en el estudio y observación de las ondas longitudinales transmitidas a través del compuesto durante el proceso de hidratación del cemento. Una de las maneras de determinar el fraguado inicial del hormigón es mediante la determinación del punto de inflexión de la curva de velocidad de la onda longitudinal. La propagación de la onda longitudinal, así como la reología del hormigón, se ven fuertemente influenciadas por la presencia de aditivos y adiciones minerales en la mezcla, y cambian durante el proceso de

hidratación de la mezcla. Esto convierte a las técnicas de US en una herramienta muy útil y sencilla para el estudio de la influencia de los diferentes componentes en el hormigón.

Para la realización de estos ensayos se dispone de dos equipos de ultrasonido diferentes: IP8 y Freshcon. Mientras que con el dispositivo IP8 los resultados obtenidos son fiables, el tratamiento de los datos obtenidos con Freshcon es problemático, sobre todo en las primeras horas de vida del mortero. En este periodo de tiempo los niveles de ruido son superiores o similares a la señal recibida y la forma, amplitud, y espectro frecuencial de la señal cambian rápidamente. Por todo esto, es imposible determinar correctamente el tiempo de llegada de la señal US, impidiendo obtener una correcta curva de velocidad con la cual se pueda estudiar con precisión el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón.

El objetivo de este proyecto es el desarrollo y aplicación de un método automatizado para el tratamiento de las señales registradas por Freshcon para la obtención de curvas de velocidad de la onda longitudinal para morteros y hormigones. El proyecto consta de las siguientes subtarefas:

- Estudio fenomenológico de las señales de ultrasonido recibidas por Freshcon, en el caso de SCM.
- Análisis del sistema automático de detección de la llegada de la señal mediante el criterio de información de Akaike (AIC) utilizado por el software de Freshcon
- Desarrollo de un método automatizado para el tratamiento de las señales ultrasónicas mediante filtros discretos de tipo Bessel para la obtención de curvas de velocidad de la onda longitudinal.
- Realización de pruebas y calibración con las diferentes configuraciones disponibles.
- Planificación y ejecución de un programa experimental sobre SCM que contienen cenizas volantes:
  - Preparación y ejecución de los ensayos tradicionales
  - Ejecución de los test de monitorización continua con Freshcon
  - Análisis de datos con el método desarrollado



## 2. Test de ultrasonidos para el estudio de la hidratación del cemento en hormigón

---

### 2.1. Hidratación del cemento portland

El cemento Portland está compuesto por cuatro materiales en bruto: cal, sílice, óxido de aluminio y óxido de hierro. Estos materiales interactúan en el horno formando compuestos químicos complejos, a veces llamados fases, que son silicato tricálcico (45-60 % en peso), silicato dicálcico (15-30 %), aluminato tricálcico (6-12 %) y aluminoferrita tetracálcica (6-8%). Las dos primeras fases al hidratarse proporcionan las características deseadas del hormigón, ya que el cemento solo adquiere sus propiedades adhesivas al reaccionar con el agua. La química del hormigón es básicamente la química de la reacción entre los granos de cemento y el agua. Dado que los productos de hidratación son los que dotan de valor adhesivo a la mezcla, su calidad, cantidad, continuidad, estabilidad y tasa de formación son muy importantes. Para obtener más información sobre el cemento, áridos, agua y otros componentes presentes en el hormigón consúltense los *Anexos A.1* y *A.2*.

Las distintas fases del cemento anhidro al mezclarse con agua, reaccionan entre ellas para formar compuestos hidratados de muy baja solubilidad. Existen dos maneras de visualizar la hidratación del cemento:

1. Mecanismo de solución: las fases del cemento se disuelven para formar una disolución supersaturada en la cual los diferentes productos de hidratación precipitan. Este mecanismo predomina en las primeras etapas de hidratación.
2. Mecanismo topoquímico: El agua ataca a los las fases del cemento en estado sólido formando productos de hidratación empezando por la superficie, y avanzando hacia el interior del grano a lo largo del tiempo. Este mecanismo predomina en las etapas de hidratación posteriores.

El proceso de hidratación es un proceso complejo, y se encuentra descrito en el *Anexo A.3*, en los aspectos de producción de calor, reacciones químicas y procesos físicos que suceden simultáneamente. De manera genérica, el proceso de hidratación del cemento puede dividirse en 3 etapas: periodo durmiente, fraguado y endurecimiento (*Figura 1* y *Figura 2*):

1. Periodo durmiente: unos minutos tras la adición de agua a la mezcla (amasado) comienza este periodo en el que el hormigón no tiene resistencia mecánica y la rigidez permanece constante o puede ser recuperada al remover. En esta fase el cemento permanece relativamente inactivo, ya que productos de hidratación rápidos o iniciales se forman en la superficie de los granos de cemento al entrar en contacto con el agua y actúan como barrera para reacciones de hidratación más lentas. El periodo durmiente termina cuando esta barrera se destruye y se disuelve por la creación de

- presión interna, producida por ósmosis o por cristales de hidróxido cálcico, que permite una aceleración del proceso de hidratación.
2. **Fraguado:** en este periodo la mezcla adquiere primero rigidez y dureza y más tarde una rápida ganancia de resistencia mecánica. Hace referencia al endurecimiento de la pasta de cemento o al cambio de estado plástico o estado sólido. Se describe en dos niveles: fraguado inicial y fraguado final. La definición de los fraguados inicial y final es arbitraria y se basa en medidas del aparato de Vicat o las agujas de Gillmore. El fraguado inicial se produce con el desarrollo de un esqueleto débil de productos de hidratación finales que hace que los granos de cemento se mantengan en una posición fija. El fraguado final tiene lugar a medida que el esqueleto se vuelve rígido.
  3. **Endurecimiento:** Hace referencia a la ganancia de resistencia en una pasta de cemento fraguada. Los espacios entre los granos de cemento se rellenan con los productos de hidratación, a medida que la pasta de cemento va aumentando su resistencia y durabilidad con una tasa decreciente [1] [2] [3].

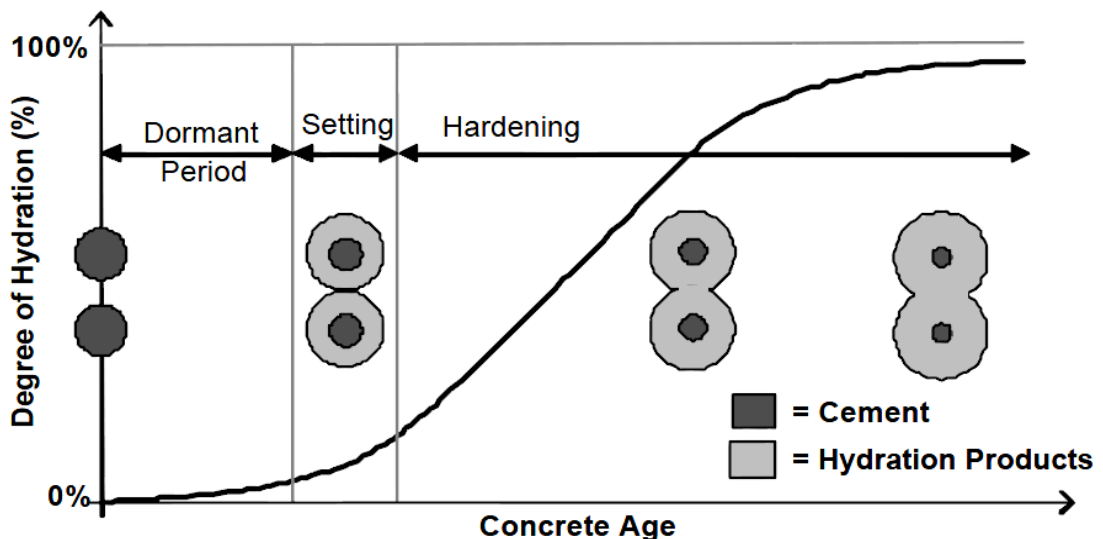


Figura 1 Hidratación del cemento portland (Fuente: [4])

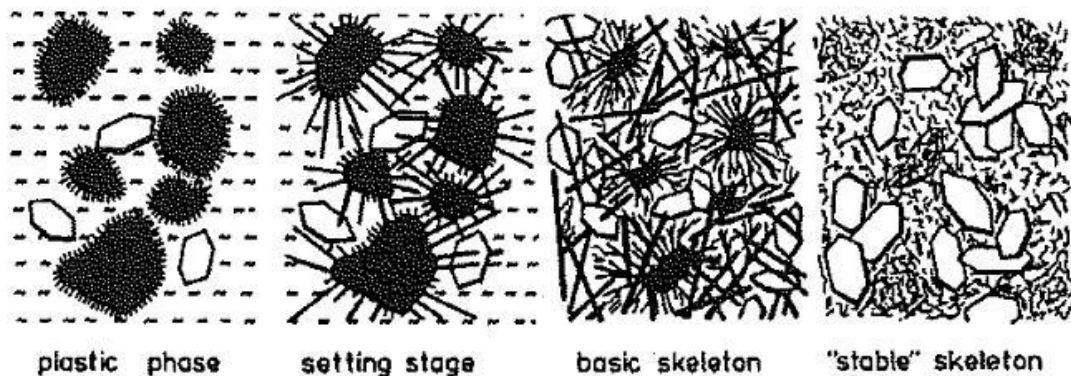


Figura 2 Microestructura del hormigón durante el proceso de hidratación (Fuente: [5])

## 2.2. Técnicas de ultrasonidos

Basándose en técnicas de US las propiedades de hormigón y mortero estándar pueden ser medidas de manera no destructiva, reproducible y ampliamente objetiva. Es de gran interés para el control de calidad de hormigón fresco que los parámetros del hormigón que influyen su calidad (por ejemplo resistencia a compresión) y trabajabilidad (por ejemplo relación agua/cemento o contenido en aire), consistencia, resistencia final, influencia de aditivos, etc. ya que tienen una influencia significativa en los parámetros de la señal US, como por ejemplo en su velocidad, amplitud o espectro frecuencial [6].

En los dispositivos de ensayo de US, un pulso es generado en una superficie de la muestra de hormigón o mortero y la onda generada viaja a través del material y es recibida en el otro lado del espécimen. El pulso US es generado por un emisor US piezoeléctrico y recibido y almacenado por un receptor piezoeléctrico. En ambos casos el pulso incidente y transmitido son grabados, convertidos en una señal digital y almacenados en memoria para inmediata o posterior evaluación de ellos [7].

En el Instituto de materiales de construcción (IWB) de la Universidad de Stuttgart, un dispositivo de US llamado Freshcon (*Figura 3*) fue desarrollado con el objetivo de investigar el fraguado y endurecimiento de hormigón y morteros con aseguramiento de la calidad.

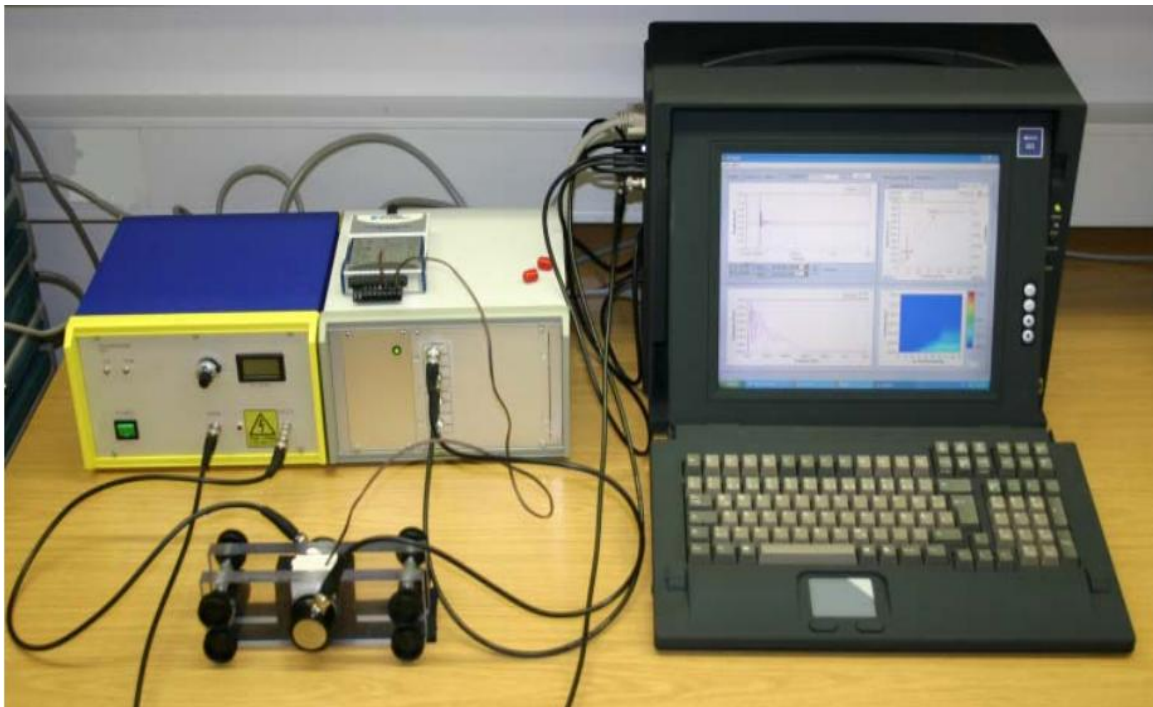


Figura 3 Vista general del dispositivo de US Freshcon (Fuente [6])

El dispositivo está basado en la observación de las ondas transmitidas a través del mortero u hormigón durante el fraguado y endurecimiento. La onda US es registrada y analizada durante el proceso casi continuamente. La forma de onda así como parámetros como el tiempo de tránsito (relacionado con la velocidad de onda), amplitud (relacionado con la energía de la onda) y el espectro frecuencial son influenciados por las propiedades elásticas

del material. Hormigones y morteros cambian su estado de una suspensión a un medio poroso saturado de agua durante el fraguado e hidratación del hormigón. Este cambio puede ser observado analizando las ondas transmitidas a través del material registradas cada cierto intervalo para documentar los cambios [7]. En este proyecto solo se ha considerado para el análisis la velocidad de señal US transmitida.

### 2.3. Curva de velocidad de la onda longitudinal

La curva de velocidad de la onda longitudinal US transmitida durante un ensayo US (Figura 4a) refleja los cambios físicos y químicos que suceden a lo largo del tiempo durante el fraguado y endurecimiento del hormigón. En todas las curvas de velocidad para diferentes mezclas pueden distinguirse tres partes. La primera parte es el periodo durmiente caracterizado por un valor de velocidad bajo y constante. Tras este periodo, la velocidad aumenta rápidamente (segunda etapa) y después más gradualmente (tercera etapa) para finalmente alcanzar un valor asintótico [8]. El momento del paso de la segunda a la tercera etapa corresponde con el punto de inflexión, o de máximo gradiente, de la curva (Figura 4b), que corresponde con el comienzo de la percolación de los productos de hidratación del cemento. Este instante está directamente relacionado con el fraguado inicial del hormigón y es el parámetro que se quiere estudiar en esta investigación [9].

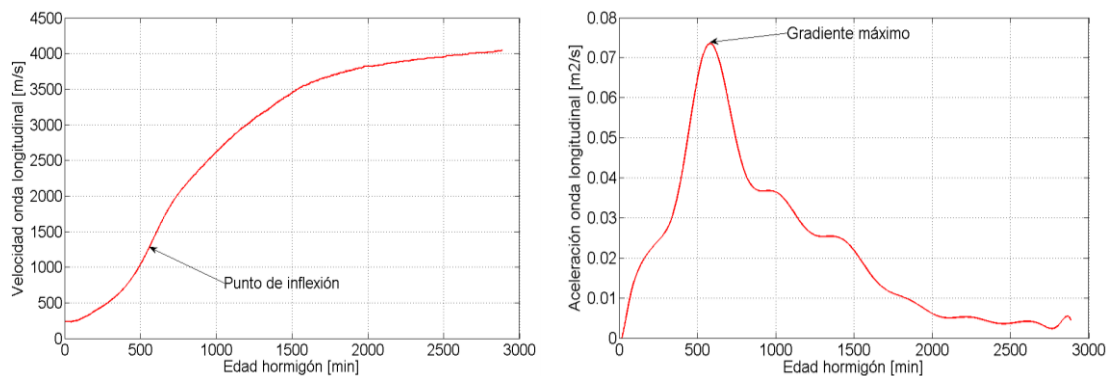


Figura 4a y 4b Curva de velocidad de la onda longitudinal transmitida a lo largo de un test US y su derivada

Al principio, el hormigón y mortero frescos pueden ser considerados una suspensión. En estas condiciones el valor de la velocidad de propagación de la onda US está fuertemente influenciado por el contenido en aire de la mezcla y típicamente se encuentra entre 200 y 600 m/s. Más adelante cuando los productos de hidratación empiezan a formarse, la relación sólido/líquido aumenta en la mezcla, produciendo un aumento en la velocidad de propagación de la onda longitudinal. Cuando estos productos de hidratación entran en contacto entre ellos (tiempo de comienzo de percolación), formando un camino sólido entre el receptor y el emisor, que favorece la transmisión de la onda US, se produce el máximo incremento en la curva de velocidad. Este momento está directamente relacionado con el fraguado inicial, es decir la creación de un esqueleto débil que hace que los granos de cemento se mantengan en una posición fija [2]. Una vez que los productos de hidratación han percolado, el proceso de hidratación continua, así como el incremento de la velocidad aunque cada vez más lentamente. En estos momentos el comportamiento del hormigón o mortero a nivel macroscópico puede ser tratado como el de un sólido elástico homogéneo. Por tanto la

velocidad de la onda longitudinal ( $V_p$ ) depende principalmente del módulo de Young ( $E$ ) y del coeficiente de Poisson( $\nu$ )[8].

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

# 3. Hormigón auto-compactante

---

## 3.1 Aspectos generales

El SCC es un hormigón de altas prestaciones que puede ser completa y uniformemente compactado sin la ayuda de vibrado. Su mayor diferencia con otros tipos de hormigón de alta trabajabilidad es su capacidad de fluir en espacios con un alto grado de reforzamiento manteniendo su integridad y homogeneidad. Fue desarrollado en Japón en los años 80 ante la falta de mano de obra cualificada [1].

Las altas prestaciones del SCC se refieren solo al estado fresco. Es posible producir un rango completo de resistencia y otras propiedades del hormigón. El SCC requiere una combinación de:

- Alta fluidez y estabilidad, alcanzada con la combinación de bajas relaciones agua/cemento (W/C) y SP, normalmente complementados por agentes modificadores de la viscosidad. Estas dos propiedades están descritas como capacidad de llenado y resistencia a la segregación, y en términos reológicos requiere bajo límite de fluencia y una alta o moderada viscosidad plástica.
- La eliminación de partículas de áridos gruesos que creen puentes entre barras de armado y bloqueen el flujo, alcanzada por un incremento en el volumen de pasta y mortero, y la consecuente eliminación de volúmenes de agregado grueso. Esta propiedad es llamada capacidad de paso [3].

En esta investigación se ha trabajado con los SP comerciales de tercera generación de polímeros de policarboxilatos de éter (PCE) llamados Glenium 27 y Glenium 51, junto con cenizas volantes como adición mineral. Es extremadamente importante que las adiciones minerales sean ensayadas y cuidadosamente investigadas en cuanto a su uniformidad y compatibilidad con el resto de los materiales empleados en el SCC, especialmente con los SP [10].

## 3.2 Superplastificantes: polímeros de policarboxilatos de éter

Para facilitar el trabajo del hormigón fresco hace falta añadir más agua que la necesaria para la hidratación. El exceso de agua más allá de la necesaria para la hidratación resulta perjudicial para todas las propiedades deseables del hormigón endurecido. Por ello se desarrollaron aditivos reductores de agua como los SP para mejorar la facilidad de trabajo con el hormigón y al mismo tiempo mantener sus cualidades [2].

Los PCE son el más reciente desarrollo en SP, llamados de tercera generación, y son una familia de productos con estructuras químicas significativamente diferenciadas. Esto es precisamente una de sus ventajas distintivas, ya que la estructura química puede ser sintetizada y modificada de tal manera que sus propiedades del hormigón pueden ser

modificadas para superar problemas de compatibilidad y satisfacer las necesidades del SCC para diferentes aplicaciones [3][11].

Cuando el agua es añadida el hormigón, los granos de cemento no están uniformemente dispersados a través del agua, sino que tienden a formar pequeños flóculos. Estos flóculos atrapan agua dentro de ellos, provocando que la mezcla sea menos móvil y fluida de lo que sería si el cemento estuviera en forma de granos individuales. Las moléculas de SP adsorbidas en la superficie del cemento rompen estos flóculos, separando los granos de cemento y liberando el agua atrapada en ellos, hechos que permiten a los granos de cemento pasar entre ellos más fácilmente, haciendo la mezcla más fluida. Este proceso es conocido como dispersión.

La estabilización estérica (*Figura 5*) es el mecanismo principal de dispersión de los SP de tipo PCE. Las moléculas de PCE tienen una moderada carga negativa que les sirve para adherirse a la superficie del grano de cemento. Las cadenas de poliéter de la molécula de PCE se orientan perpendiculares a la superficie del cemento y se resisten entrelazarse con las cadenas de poliéter de los granos de cemento adyacentes, manteniendo los granos separados [11].

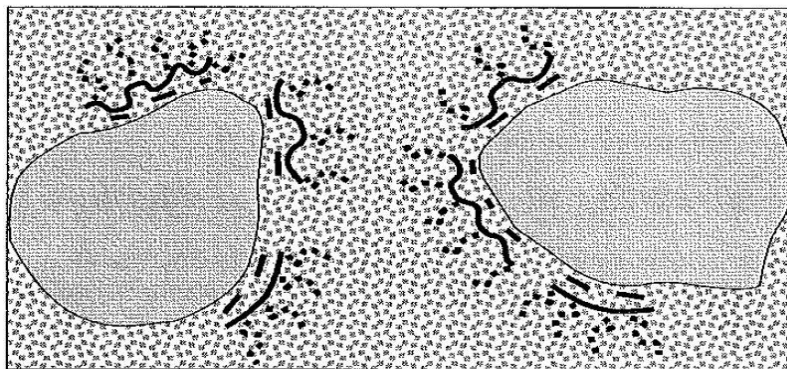


Figura 5 Dispersión de los granos de cemento por estabilización estérica producida por las moléculas de PCE. La molécula real de PCE es mucho más pequeña relativa al grano de cemento que lo representado (Fuente: [11])

### 3.3 Aditivos minerales: cenizas volantes

El SCC precisa de un alto contenido en polvo (cemento + adiciones minerales) y una baja relación agua/polvo. Adiciones minerales de muchos tipos han sido usadas: casi inertes como caliza en polvo, puzolánicas como cenizas volantes o humo de sílice, o hidráulicas latentes como escoria de alto horno molida. En general las ventajas que pueden obtenerse son:

- Control de la resistencia, particularmente cuando no es necesaria la alta resistencia que aportaría el uso de cemento Portland en solitario.
- Reducción del calor de hidratación y por tanto reducción del riesgo de fractura térmica.
- Mejora de la estabilidad y comportamiento reológico.

- Reducción del impacto medioambiental de la industria cementera reemplazando cemento Portland por productos de desecho.

Aunque cada tipo de adición tendrá diferentes efectos en las propiedades en los estados fresco y endurecido, la preferencia para diferentes aplicaciones parece haber sido basada principalmente en la familiaridad con su utilización previa en hormigones tradicionales y la práctica local, experiencia, disponibilidad y coste. Aunque los SCC con mayor resistencia contienen cantidades significativas de adiciones inertes, es atractivo medioambiental y económicamente considerar la incorporación de materiales de desecho con el tamaño de partícula adecuado.

La ceniza volante es un subproducto de la combustión de carbón pulverizado de las calderas de centrales térmicas y es filtrada electrostáticamente de los gases de combustión antes de ser emitidos a la atmósfera. La composición química de la ceniza volante es muy parecida a la de las puzolanas naturales. Sus propiedades químicas y físicas son fuertemente dependientes de la clase de carbón del cual provienen y la clase de caldera. La ceniza volante es un polvo fino cuyas partículas son típicamente esféricas.

Una puzolana está compuesta principalmente de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que en presencia de agua reacciona con  $\text{Ca(OH)}_2$  y forma compuestos con propiedades cementíticas. El  $\text{Ca(OH)}_2$  es un subproducto del proceso de hidratación del cemento. La reacción de la ceniza volante es una reacción lenta en comparación con la hidratación del cemento, y aparece aparentemente entre 3 y 14 días tras la mezcla con agua, una vez que el hormigón ha fraguado. El periodo de incubación de la reacción puzolánica se explica por la fuerte dependencia de la de la solubilidad de las partículas de cenizas volantes en la alcalinidad de la de la disolución. La reacción puzolánica no comienza hasta que no se ha alcanzado un cierto nivel de pH.

El efecto de la ceniza volante en el hormigón en el que está presente no solo está relacionado con la actividad puzolánica sino también en la capacidad de modificar la hidratación del cemento. La presencia de ceniza volante afecta a muchos aspectos de la hidratación del cemento como la cinética de la reacción, la composición de los hidratos, etc. Se ha observado que ambas reacciones tienden a acelerarse entre ellas, pero la interferencia de ambos procesos y la dependencia de la interferencia del tipo de ceniza volante hacen extremadamente complicado la distinción de las contribuciones de ambos procesos en la reacción general de hidratación [5].

En esta investigación las cenizas volantes no reemplazan al cemento sino que son añadidas adicionalmente. Con este método la mezcla tiene un mayor contenido cementoso y exige un reajuste en la dosificación. Con este método se consigue un aumento de resistencia adicional a todas las edades debido a la reacción puzolánica de la ceniza volante. Este aumento es muy pequeño hasta los 7 días, pero resulta importante a los 3 meses y un año [10].



# 4. Estudio del tratamiento inicial de datos del dispositivo de ultrasonidos

---

## 4.1 Descripción general

Freshcon es un dispositivo de US de banda ancha para el estudio de la hidratación del cemento en hormigones y morteros de manera no destructiva, reproducible y objetiva. El aparato dispone de dos configuraciones con unos 20 y 55 mm entre el emisor y el receptor piezoeléctricos, diseñadas para estudiar originalmente mortero y hormigón respectivamente. En esta investigación solamente se ha trabajado con morteros (en ambas configuraciones) ya que el mortero es un material más homogéneo debido a la ausencia de grava y por tanto los resultados reflejan de manera más fidedigna las características globales de la mezcla sin tener que ensayar grandes volúmenes de material. Además, siempre se puede calcular el equivalente de un hormigón en mortero y viceversa, una vez analizados los resultados.

Debido a las características de los SCM analizados en este proyecto los ensayos de monitorización duran 2 días y generalmente una señal es emitida y recibida cada minuto. Cada señal recibida y almacenada es la media de 3 señales emitidas y recibidas en un segundo.

En este proyecto se ha trabajado con dos escalas de tiempo diferentes y que no deben ser confundidas:

- La edad del hormigón o mortero ( $T_c$ ): tiempo en minutos u horas tras la adición de agua a la mezcla
- Escala de tiempo de una señal US ( $T_s$ ): escala de tiempo de una sola señal US recibida expresado en microsegundos.

Si se desea obtener información más detallada sobre este capítulo, consúltese el *Anexo C*.

## 4.2 Señal emitida

Freshcon es un dispositivo de US de banda ancha. Un pulso de 2.5  $\mu$ s y 800 V es generado en emisor piezoeléctrico. El espectro frecuencial aproximado de la señal emitida es el mostrado en la *Figura 6*, cuyo máximo pico de frecuencia corresponde a unos 450 kHz y cuya máxima frecuencia con una amplitud mayor de -30 dB corresponde a unos 700 kHz.

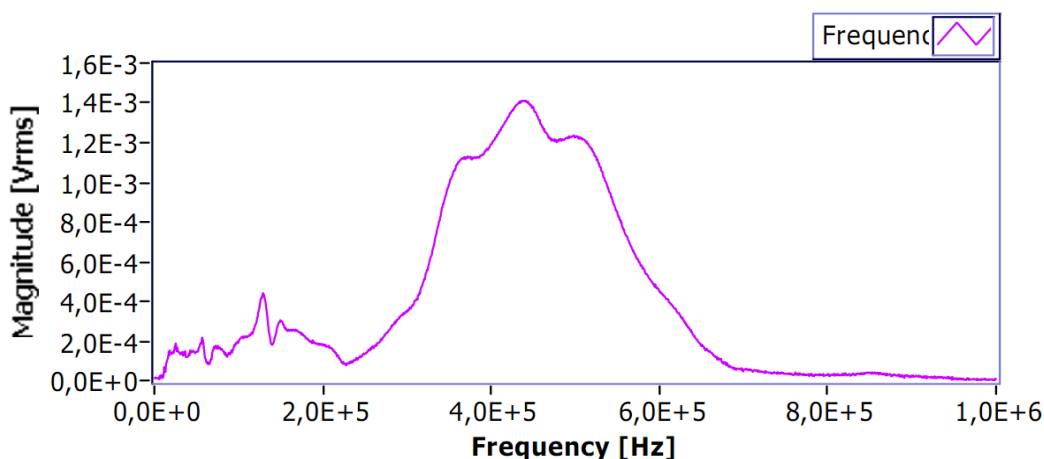


Figura 6 Espectro frecuencial de la señal US emitida

### 4.3 Señal recibida

Una señal recibida en un ensayo de US (Figura 7) es una señal discreta con una frecuencia de muestreo de 10 MHz y contiene los siguientes elementos:

- La señal recibida US: es la señal emitida por el emisor piezoeléctrico tras viajar a través del material. Su amplitud, tiempo de llegada y contenido frecuencial depende de la mezcla analizada y su edad.
- El disparador: el pulso que excita el emisor es también registrado y establece el contador de tiempo de la señal. Es un pulso de amplitud constante situado próximo a  $T_s=0$ .
- Ruido: Ruido de alta y baja frecuencial es registrado por el receptor. Tiene aproximadamente la misma amplitud durante todo el test US, y una distribución aleatoria constante a lo largo de todo el espectro de frecuencia (Figure C.6).
- Señal reflejada: Una parte de la señal US es reflejada por la superficie del receptor y es registrada en posteriores reflexiones.
- Tiempo de llegada calibrado: Tiempo real que transcurre entre la emisión y la recepción de la señal

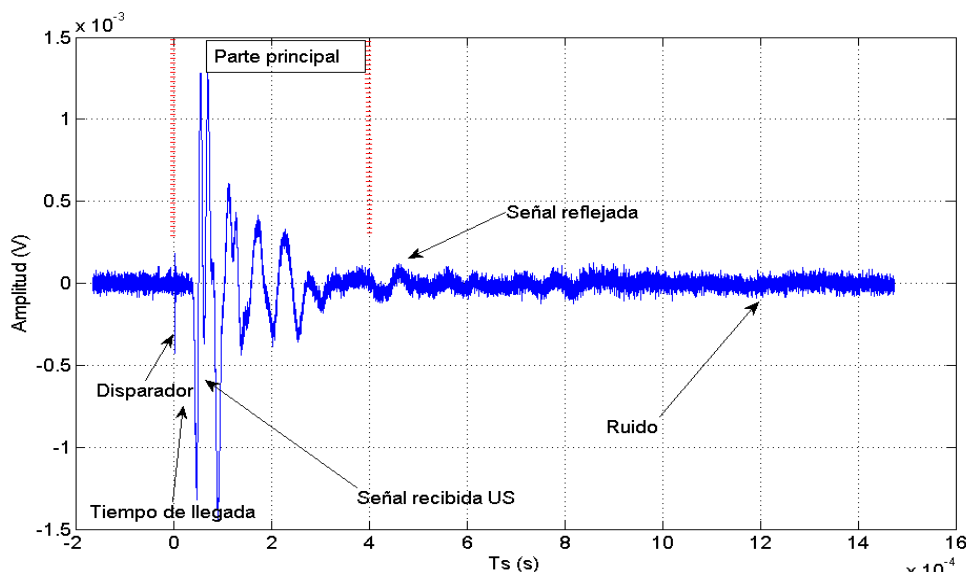


Figura 7 Señal recibida típica con sus elementos constituyentes

No solo la velocidad sino también la amplitud, forma y contenido frecuencial de la señal recibida a lo largo de un ensayo cambia considerablemente. Una muestra de hormigón o mortero puede ser considerada como un filtro con una frecuencia de corte que aumenta durante el fraguado y endurecimiento del material. Dicho filtro tiene un factor de atenuación dependiente de la frecuencia de la señal. La *Figura 8a* representa el espectro frecuencial de las señales recibidas a lo largo de un ensayo de US de un SCM que contiene cenizas volantes, siendo cada línea vertical el espectro frecuencial para la señal recibida en  $T_c$  representado en el eje horizontal. Puede observarse que la amplitud de las señales recibidas al final del test es netamente mayor que al principio del mismo. La *Figura 8b* representa el espectro del mismo ensayo, pero habiendo normalizado el espectro frecuencial de cada señal. El máximo pico de frecuencia aumenta de entorno a 20 kHz hasta 450 kHz a lo largo del ensayo. Además se observa que la amplitud de la señal US recibida es del mismo orden de magnitud que la amplitud del ruido en los primeros 400 minutos.

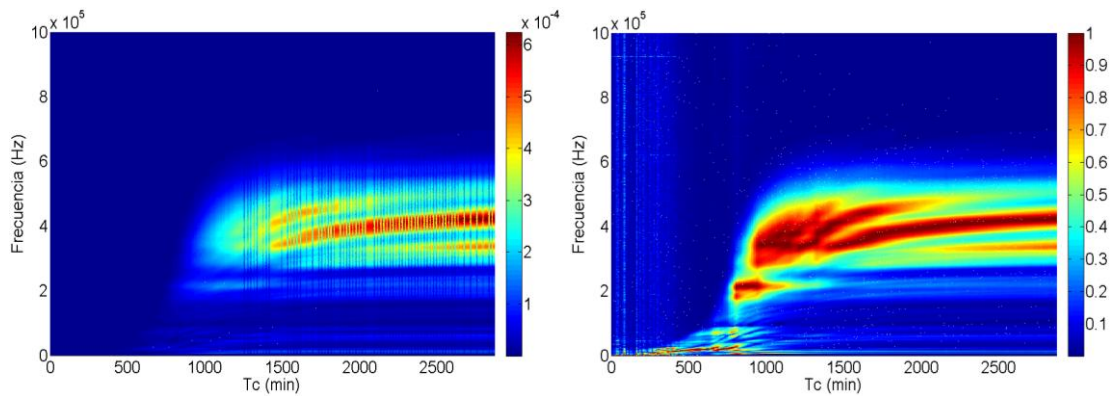


Figura 8a y 8b Espectro frecuencial de las señales US recibidas en un test de 2 días para SCM que contiene cenizas volantes

A continuación se muestra la evolución que sufren las señales recibidas a lo largo de un ensayo US de SCM, con  $T_c$  igual a 10 (*Figura 9a*), 200 (*Figura 9b*), 500 (*Figura 10a*) y 1500 min (*Figura 10a*). Como puede observarse, la amplitud del ruido y del disparador permanecen constantes, y es la amplitud de la señal US la que aumenta considerablemente con  $T_c$ . Esto hace que también aumente la relación señal/ruido, al igual que la facilidad de determinar manualmente el tiempo de llegada de la señal US recibida. Nótese que en la *Figura 10b* el eje vertical cambia.

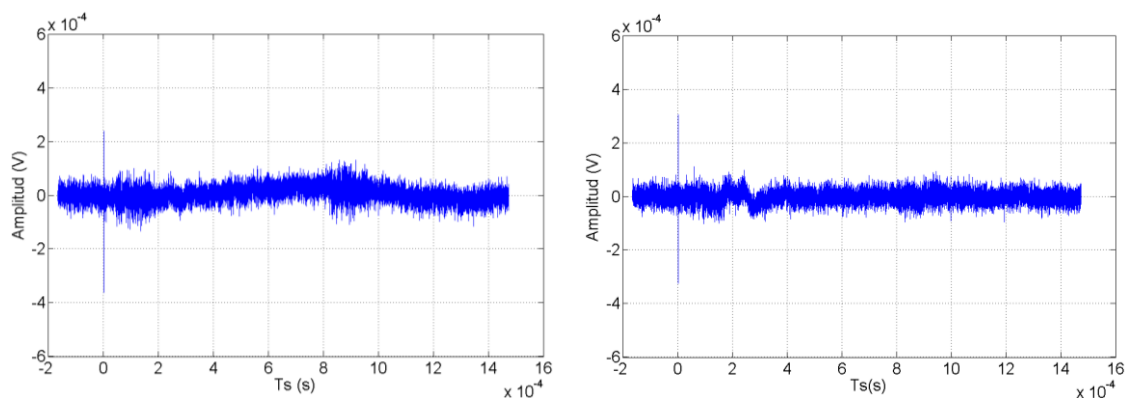


Figura 9a y 9b Señales US recibidas con  $T_c = 10$  y 200 min para SCM

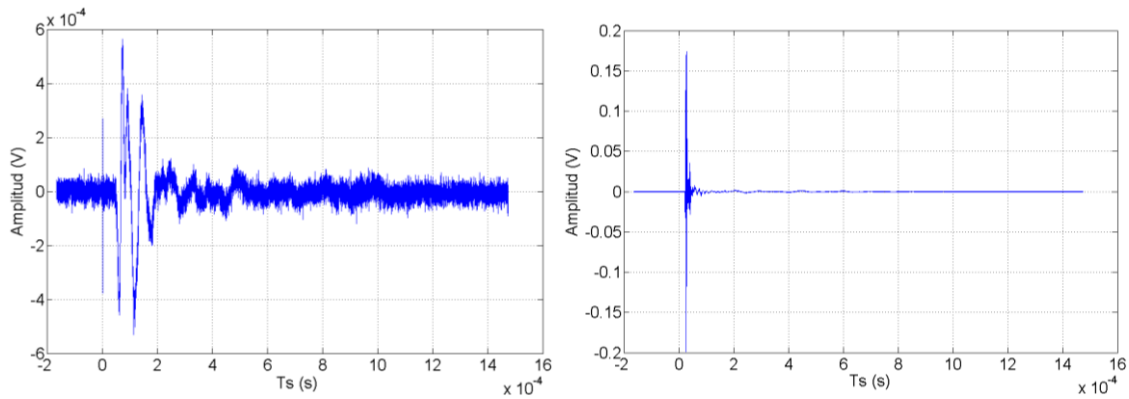


Figura 10a y 10b Señales US recibidas con  $T_c = 500$  y  $1500$  min para SCM

#### 4.4 Detección del tiempo de llegada de la señal

Para una correcta determinación de la velocidad de la onda longitudinal transmitida en el hormigón es de capital importancia la determinación precisa de la distancia recorrida por la señal y el tiempo transcurrido. La distancia es medida con un pie de rey directamente en la muestra de hormigón tras su análisis por US. El tiempo de llegada de la señal es determinado con un algoritmo implementado en el software del dispositivo Freshcon, basado en el criterio de información de Akaike (AIC, en inglés Akaike Information Criterion). El funcionamiento del algoritmo AIC está detallado en el *Anexo B* y en dicho algoritmo la determinación del tiempo de llegada de la señal se realiza en 2 etapas:

- Determinación del tiempo preliminar de llegada: Se calcula una envolvente de la señal recibida mediante la transformada Hilbert, que es posteriormente cuadrada y normalizada. El tiempo preliminar de llegada se determina aplicando un umbral simple a dicha envolvente normalizada.
- Determinación del tiempo exacto de llegada: Se calcula la función AIC en una ventana entorno al tiempo de preliminar de llegada, y el mínimo de esta función es el tiempo exacto de llegada de la señal US que permite determinar su velocidad [12].

Se ha observado que la detección del tiempo de llegada de la señal US con el algoritmo AIC es problemática aplicándolo directamente en los datos originales del laboratorio, principalmente por 2 motivos:

- La relación ruido/señal: La determinación del tiempo de llegada de la señal US está fuertemente influenciada por el ruido contenido en la señal. Para comprobar esta influencia una señal ruido de diferentes amplitudes ha sido añadida a una señal sintética sinusoidal con un tiempo conocido de llegada de 500 muestras (*Figura 11a*). El tiempo de llegada de la señal US con los diferentes niveles de ruido ha sido determinado con el algoritmo AIC. Se ha observado que cuanto mayor es la amplitud del ruido en comparación con la de la señal sintética, mayor es el error cometido (retraso) en la determinación del tiempo de llegada (*Figura 11b*), e incluso cuando la amplitud del ruido es mayor que la de la señal sintética la determinación del tiempo de llegada es totalmente errónea. En señales reales, el primer flanco de la señal US no es

tan pronunciado al del ejemplo, el primer semiperiodo de la señal está más atenuado, y el espectro frecuencial de la señal es más complejo. Por tanto el error del algoritmo AIC en una señal real es mayor que el mostrado en este ejemplo. La principal conclusión que ese debe sacar de este ejemplo es que para una precisa determinación del tiempo de llegada de las señales con el algoritmo AIC es necesario reducir la amplitud del ruido lo máximo posible.

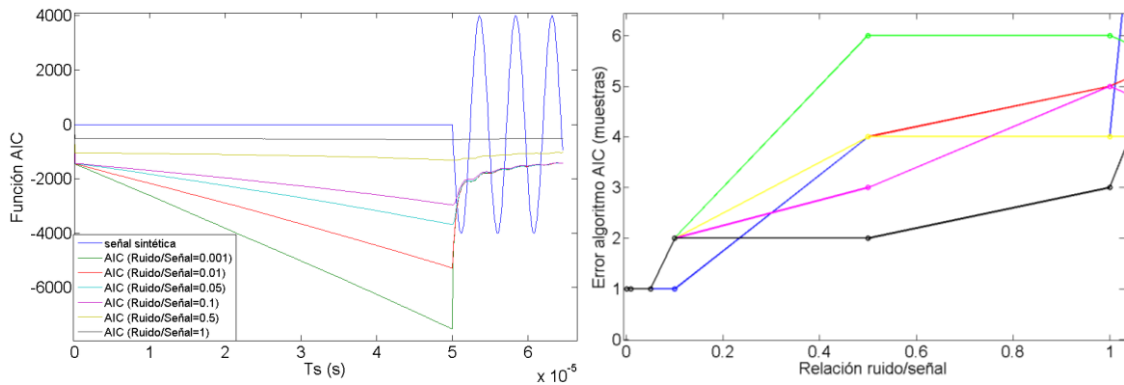


Figura 11a y 11b Función AIC de la señal sintética con ruido con diferente amplitud y error producido en la determinación del tiempo de llegada para distintas señales con ruido de diferente amplitud

- El disparador: Si la amplitud del disparador es del mismo orden de magnitud que la amplitud de la señal recibida US, este interfiere en la detección del tiempo de llegada imposibilitando una correcta detección como se muestra en la *Figura 12*.

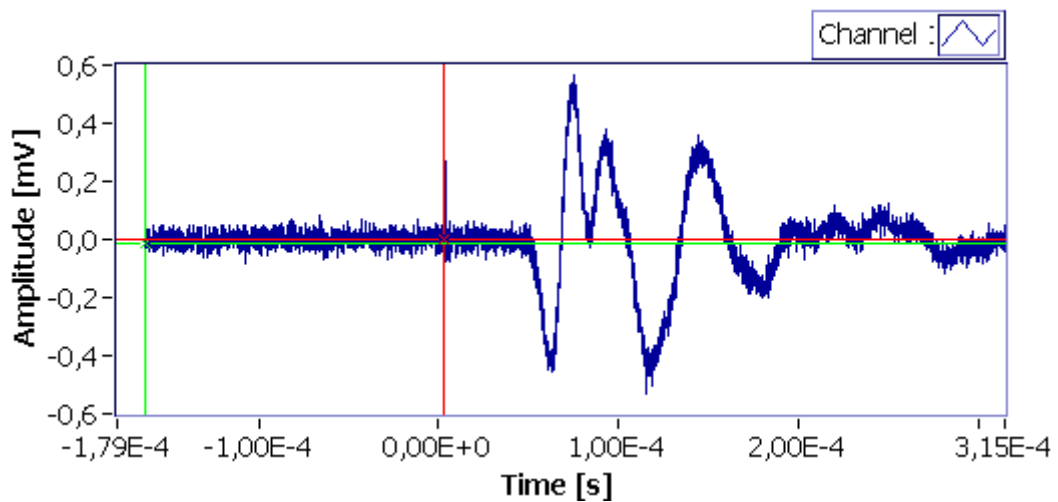


Figura 12 Determinación incorrecta (en rojo) del tiempo de llegada de la señal US debido a que la amplitud del disparador es del mismo orden de magnitud que la de la señal US

#### 4.5 Punto de partida

Para valorar la magnitud de estos problemas es necesario conocer los errores que inducen en la curva de velocidad. Dado el carácter irregular de las curvas de velocidad obtenidas por Freshcon, y la imposibilidad de dominar, controlar y simular un proceso tan complejo como la hidratación del cemento para determinar una curva de velocidad que sirva

de referencia, para un determinado ensayo US de un SCM se determina una curva de referencia determinando manualmente el tiempo de llegada de las señales, considerando el posible error introducido por el usuario en la detección (*Figure C.15*). Debido a lo tedioso del trabajo de determinar manualmente el tiempo de llegada de 2880 señales, solo se considera una señal de cada 20 en los primeros  $T_c=900$  min (siempre que sea posible) y una señal de cada 30 para  $T_c$  mayor.

Si se compara la curva de velocidad obtenida con el algoritmo AIC con la referencia creada manualmente (*Figura 13a*) se observa que los valores de velocidad obtenidos con el algoritmo AIC son generalmente menores a los de referencia, debido a los problemas en la detección del tiempo de llegada que produce el ruido de alta frecuencia. Además, también puede observarse que no se obtienen valores de velocidad por los problemas que causa el disparador para  $T_c$  menor que 400 minutos, siendo valores próximos al posible  $T_c$  del punto de inflexión de la curva de velocidad. Es decir, que no solo los valores de velocidad obtenidos tienen un error respecto a la referencia creada, sino que no es posible obtener valores de velocidad cercanos a la zona de la curva en la que estamos especialmente interesados en esta investigación. Nótese que un retraso de una muestra en la determinación de del tiempo de llegada produce diferentes errores en la velocidad calculada (*Figura 13b*), dependiendo de la velocidad de la onda longitudinal (por ejemplo, con una distancia entre emisor y receptor de 55 mm, el error cometido a 300 m/s es de 0.2 m/s y a 5000 m/s es de 55 m/s).

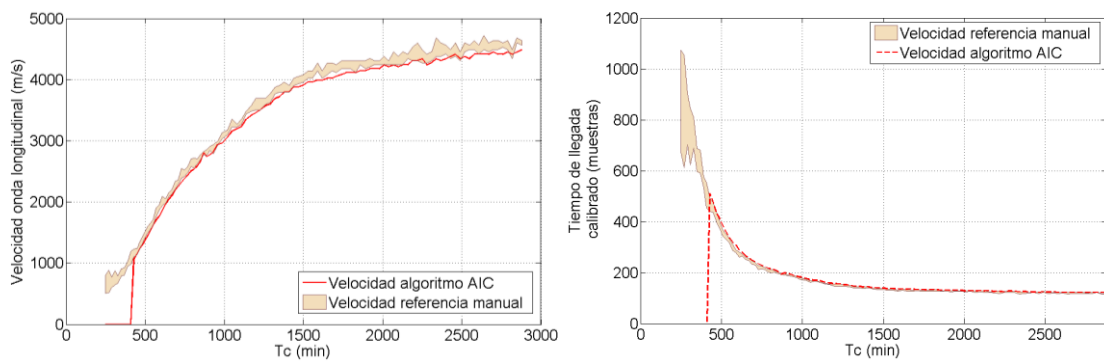


Figura 13a y 13b Comparación de las curvas de velocidad y tiempo de llegada de la señal US mediante detección manual y con el algoritmo AIC del tiempo de llegada de la señal US

# 5. Desarrollo de un método para el tratamiento de datos

---

## 5.1 Introducción

Un método automatizado (*Anexo F*) ha sido desarrollado utilizando el software Matlab para obtener la curva de velocidad de la onda longitudinal en hormigón y mortero con los datos de los ensayos de monitorización US con el dispositivo Freshcon. Este método soluciona o minimiza dentro de lo posible los problemas descritos en el capítulo anterior. Está basado en el filtrado de las señales originales o compuestas con un filtro discreto de paso bajo de tipo Bessel para reducir la amplitud del ruido de alta frecuencia. Durante todo el proceso, se intenta preservar la forma original de la señal US recibida, mientras que los elementos problemáticos de la señal recibida como el disparador o el ruido son modificados. El objetivo principal del método es ajustar la curva de velocidad resultante a la curva de velocidad calculada manualmente como referencia y obtener resultados de velocidad en torno a la zona importante de la curva en esta investigación: el punto de inflexión.

## 5.2 Esquema general de funcionamiento

El método desarrollado está dividido en 7 etapas, como muestra la *Figura 14*:

1. Partiendo del espectro frecuencial de todas las señales la curva de la frecuencia de corte del filtro es calculada en función de  $T_c$ . Con esta curva de frecuencia de corte también se determina que señales van a ser compuestas calculando la media de varias señales y cuáles no, y el número de señales para calcular dicha señal media.
2. Si es necesario, la señal media de varias señales originales es calculada para crear la señal compuesta.
3. Las señales originales o compuestas son filtradas con un filtro discreto de paso bajo de tipo Bessel. La principal función del filtro es atenuar la amplitud del ruido de alta frecuencia para permitir mayor precisión en la labor del algoritmo AIC.
4. Por medio de la función correlación cruzada (o covarianza cruzada) el retraso entre la señal filtrada y la previa al filtro es calculado.
5. La parte principal de la señal que contiene el disparador, el tiempo de llegada y la señal US recibida es modificada para mejorar el funcionamiento del algoritmo AIC, y el resto de la señal es eliminado.
6. Después de haber tratado todas las señales, su tiempo de llegada es calculado y la curva de velocidad preliminar es obtenida con el algoritmo AIC implementado en el software de Freshcon. Esta etapa es la única del método automatizado que no ha sido desarrollada en este proyecto.
7. Finalmente, la curva de velocidad es corregida: el retraso introducido en el filtro es restado al tiempo de llegada calculado con el algoritmo AIC.

En los siguientes apartados se explican a grandes rasgos los procesos antes mencionado. Si se desea conocer más detalles, se debe consultar el *Anexo D*.

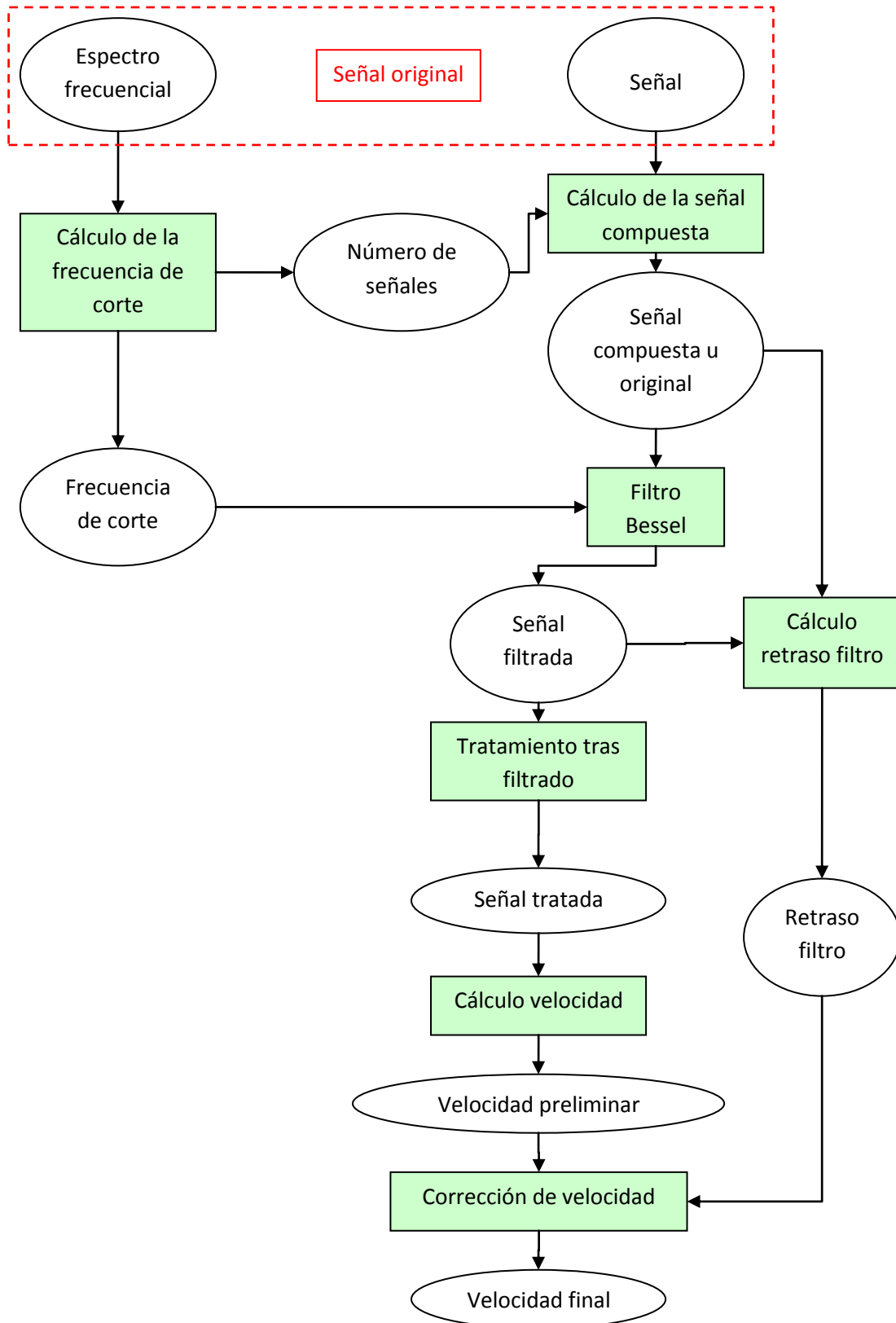


Figura 14 Esquema general de funcionamiento del método automatizado



### 5.3 Cálculo de la frecuencia de corte del filtro

Partiendo del espectro frecuencial de todas las señales originales la frecuencia de corte del filtro es calculada en función de  $T_c$ . El valor de la frecuencia de corte tiene una gran importancia en la eficiencia del método: valores demasiado grandes producen señales con demasiado ruido que dificultan la labor del algoritmo AIC, mientras que valores demasiado bajos modifican en exceso la forma de la señal US recibida, especialmente su contenido en altas frecuencias, las cuales hacen el flanco de llegada de la señal US más pronunciado.

La frecuencia de corte del filtro es calculada en varios pasos (*Figura 15*):

1. El espectro frecuencial es dividido por la máxima amplitud del mismo (normalización).
2. El espectro de frecuencia normalizado es comparado con un umbral (TH, en inglés threshold). La máxima frecuencia con una amplitud mayor que TH es seleccionada.
3. La frecuencia seleccionada es multiplicada por un factor de seguridad (CS) para obtener la frecuencia de corte final que contiene todo el espectro de la señal US recibida.

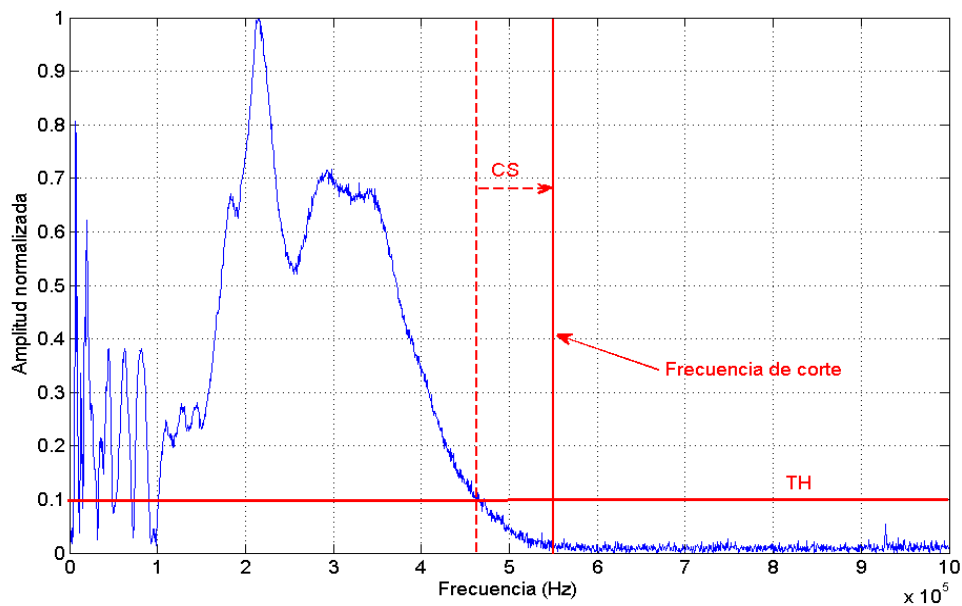


Figura 15 Parámetros TH y CS para el cálculo de la frecuencia de corte del filtro

Para las mezclas analizadas en este proyecto (SCM que contiene cenizas volantes y SP Glenium 27 o Glenium 51) los parámetros  $TH=0.1$  y  $CS=1.2$  se han mostrado apropiados para el análisis (Ver discusión en *Anexo D.2*). Estos parámetros pueden tomarse como referencia para otros compuestos, pero en el futuro debería de comprobarse su validez.

Una vez calculada una curva de la frecuencia de corte del filtro en función de  $T_c$  se observa que esta tiene picos, debidos a que a veces la amplitud del ruido de alta frecuencia es mayor que el umbral TH aplicado. Estos picos no son deseados por no corresponder al límite superior del espectro de frecuencia de la señal recibida US, y son eliminados (*Figura 16a*). Tras ser eliminados los picos la curva aun es irregular y tiene pequeños saltos (*Figure D.9*), y dado que discontinuidades en la curva de frecuencia producen discontinuidades en la curva de

velocidad (*Figure D.8*), la curva de frecuencia de corte es suavizada tomando la media de 99 valores para cada punto. En la *Figura 16b* se observa que la frecuencia de corte finalmente obtenida se ajusta a la forma del espectro frecuencial de la señal recibida US.

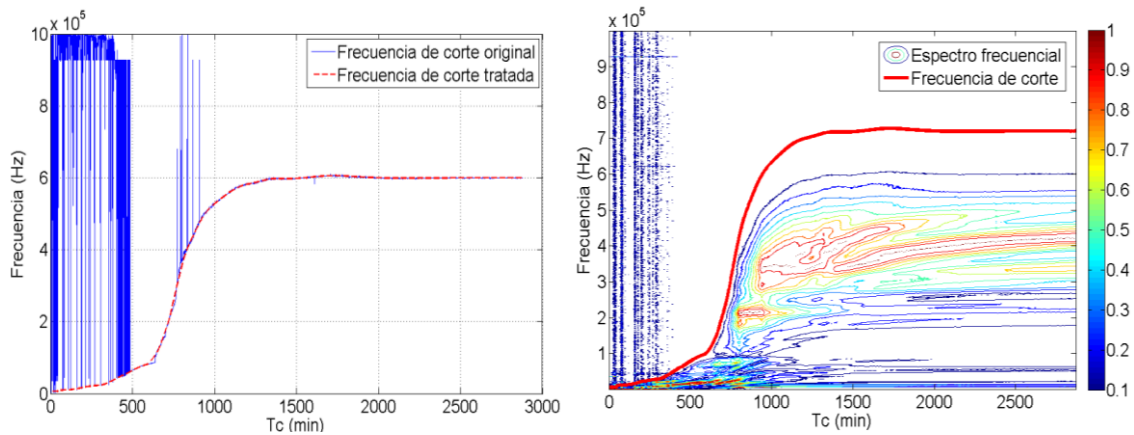


Figura 16a y 16b Frecuencia de corte original (sin multiplicar por CS) y comparación entre la frecuencia de corte del filtro final y el espectro frecuencial de las señales del test US

## 5.4 Filtro tipo Bessel

En electrónica y procesamiento de señales, un filtro tipo Bessel es un filtro lineal caracterizado por tener una fase lineal en las zonas pasantes, por lo que no distorsionan las señales. En este caso se utiliza un filtro tipo Bessel de paso bajo para reducir la amplitud del ruido de alta frecuencia. Este filtro está caracterizado por su función de transferencia:

$$H(s) = \frac{\theta_n(0)}{\theta_n(s/\omega_0)}$$

donde  $\theta_n(0)$  es un polinomio de Bessel invertido del cual el filtro toma el nombre y  $\omega_0$  es la frecuencia de corte deseada. El filtro tiene un retraso de fase a bajas frecuencias de  $1/\omega_0$  [13]. Un filtro Bessel de primer orden tiene una atenuación en la frecuencia de corte de -3dB (K=0.71) y un retraso de fase de 45°.

Dado que las señales que son filtradas son discretas con una frecuencia de muestreo de 10 MHz es necesario trabajar con un filtro discreto. El filtro tipo Bessel es discretizado usando el método de Tustin. El método Tustin aplica una transformación bilineal para computar el modelo discretizado, introduce menos distorsión de la ganancia y la fase cerca de la frecuencia de Nyquist que otros métodos y aproxima retrasos fraccionales al múltiplo entero del periodo de muestreo más cercano [14][15]. Teniendo en cuenta que la frecuencia de Nyquist del sistema (5 MHz) es mucho mayor que la mayor de las frecuencias de la señal US (700 kHz), el filtro tipo Bessel discretizado por el método de Tustin es una buena elección y una aproximación precisa del filtro continuo. En la *Figura 19a* puede observarse un ejemplo de cómo se reduce el ruido de alta frecuencia gracias a la aplicación del filtro anteriormente descrito.

## 5.5 Señales compuestas

Si las señales recibidas originales con bajo  $T_c$  son filtradas sin otro tratamiento previo, la señal filtrada todavía tiene un ruido con una amplitud considerable (*Figura 18*) y la determinación correcta del tiempo de llegada con el algoritmo AIC es complicada. Por ello es necesaria la aplicación de otro tratamiento para mejorar la situación y atenuar el ruido en la señal recibida. Siguiendo el principio de funcionamiento de Freshcon (que calcula la señal recibida como la media de 3 señales), la señal media de 3, 7 o 11 señales es calculada para conformar la señal compuesta que después será filtrada y tratada (*Figura 17a* y *Figura 17b*). Esta es una manera efectiva de reducir la amplitud del ruido por compensación sin producir retrasos. El error que puede ser introducido en el tiempo de llegada o el cambio en la forma de la señal por tratar con señales con una diferencia de hasta 11 minutos, se ve minimizado por el hecho de que al comienzo del test las velocidades son bajas y cambian muy gradualmente. Además este efecto puede reducirse reduciendo el periodo de muestreo de  $T_c$  a 15, 20 o 30 segundos durante las primeras 12 horas del ensayo.

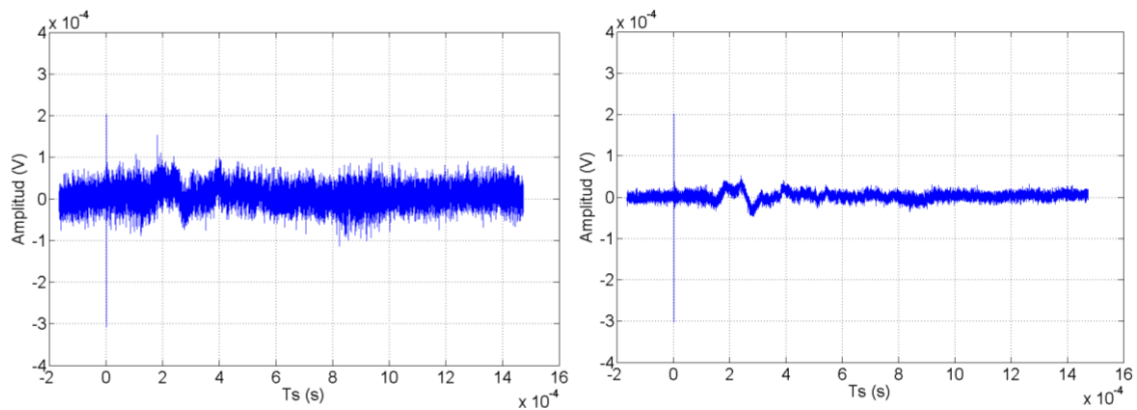


Figura 17a y 17b Señal original y compuesta con  $T_c=200$  min para SCM

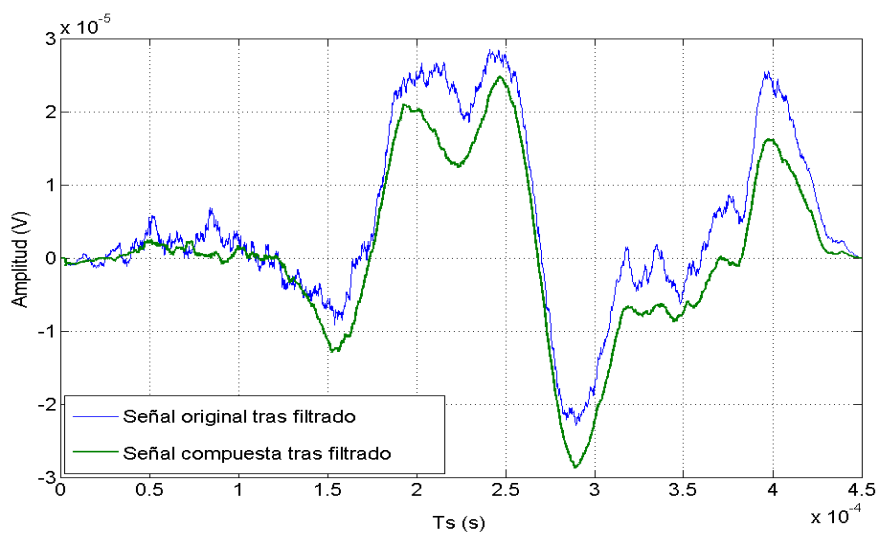


Figura 18 Señal original y compuesta tras filtrado con  $T_c=200$  min para SCM

Las señales con  $T_c$  menor son compuestas con 11 señales, y conforme  $T_c$  va creciendo son compuestas con 7 señales primero, con 3 más adelante y finalmente no se compone

ninguna señal y es la señal original la que es filtrada. La determinación de las señales que son compuestas y el número de señales con las que se calcula la señal media se realiza a partir de la curva de frecuencia de corte del filtro calculado (*Anexo D.4*). Para la determinación de estos niveles de frecuencia es necesaria tener experiencia previa con mezclas de similar composición y estimar un tiempo aproximado de comienzo de la percolación. Por tanto para SCM con otra adición mineral a las cenizas volantes o SP distintos a los PCEs, puede ser necesario modificar los niveles establecidos.

## 5.6 Cálculo de retraso producido en el filtro

El filtrado de las señales produce señales con niveles de ruido más bajo y reduce los errores y retrasos existentes en el algoritmo AIC. Pero el hecho de usar un filtro introduce nuevos retrasos, debido al retraso de fase de los filtros causales. La ventaja de este retraso, comparado con el del algoritmo AIC, es que puede ser medido y corregido por medio de la correlación cruzada. La correlación cruzada o covarianza cruzada es aplicada a la señal filtrada y a la señal previa a ser filtrada, y su retraso es calculado determinando el máximo de la función correlación cruzada.

En procesamiento de señales, la correlación cruzada es una medida de la similitud de 2 ondas como función de un desfase temporal aplicado a una de ellas. Para funciones discretas, la correlación cruzada está definida como [16]:

$$(f \circ g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m] g[n + m]$$

La fórmula esencialmente desplaza la función  $g$  a lo largo del eje horizontal calculando la integral del producto de  $f$  y  $g$  en cada posición. Cuando las funciones están alineadas el valor de la función correlación cruzada es máximo y el desplazamiento aplicado es el retraso entre las dos señales.

El cálculo del retraso inducido por el filtro por medio de la correlación cruzada puede ser ilustrado con un ejemplo real. La *Figura 19a* muestra una señal original y una señal filtrada. La correlación cruzada de las dos señales (*Figura 19b*) es calculada y el valor en muestras de donde está situado el máximo de dicha función es el retraso que tiene la señal filtrada (en este caso 18 muestras o  $1.8 \mu\text{s}$ ).

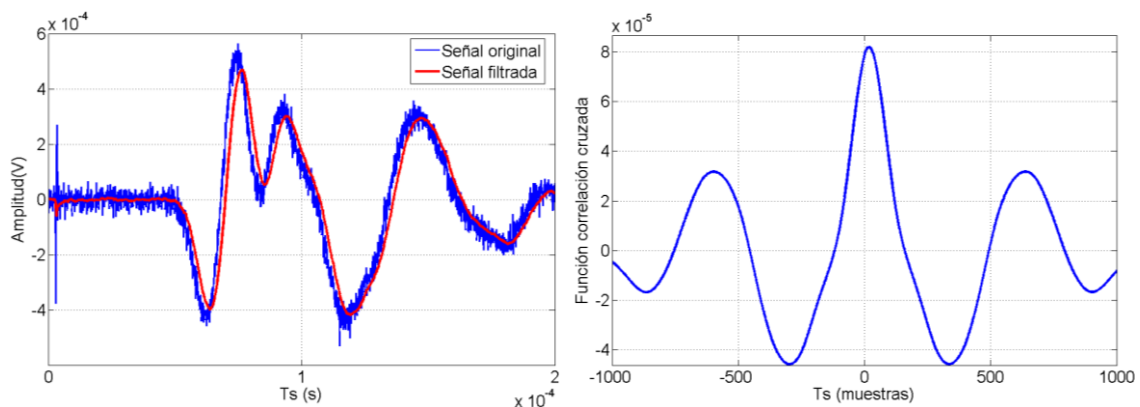


Figura 19a y 19b Señal original y filtrada y correlación cruzada de ellas

## 5.7 Tratamiento tras filtrado

La señal filtrada es posteriormente tratada, siendo multiplicada por una ventana trapezoidal (*Figura 20a*). Los objetivos de este tratamiento son evitar tres de los problemas descritos en el *Capítulo 4.4* y *Anexo C.8*:

1. Hacer el cálculo del algoritmo AIC más rápido, analizando solo la parte de la señal que contiene los elementos necesarios para la detección del tiempo de llegada.
2. Eliminar los problemas causados por el disparador en mezclas con bajo  $T_c$  atenuando su amplitud.
3. Evitar posibles problemas en la labor del algoritmo AIC que pueden producir señales con una gran amplitud al final de la misma.

El tratamiento consiste en seleccionar la parte de la señal de un tamaño  $sz$  (3000 o 4500 muestras), y multiplicar las primeras muestras  $lw$  (100,300 o 500) por un factor lineal creciente para atenuar la amplitud del disparador, al igual que las últimas muestras  $hw$  (500) por un factor lineal decreciente para atenuar posibles señales con gran amplitud en su parte final. El valor que toman estos 3 parámetros depende de cómo ha sido tratada la señal antes de ser filtrada (si ha sido original o compuesta y el número de señales con las que se ha calculado esta última) y se pueden encontrar más detalles en el *Anexo D.6*. Las señales resultantes de este tratamiento no presentan problemas para ser analizadas con el algoritmo AIC ya que la amplitud del ruido y del disparador es baja comparada con la de la señal US recibida (*Figura 20b*).

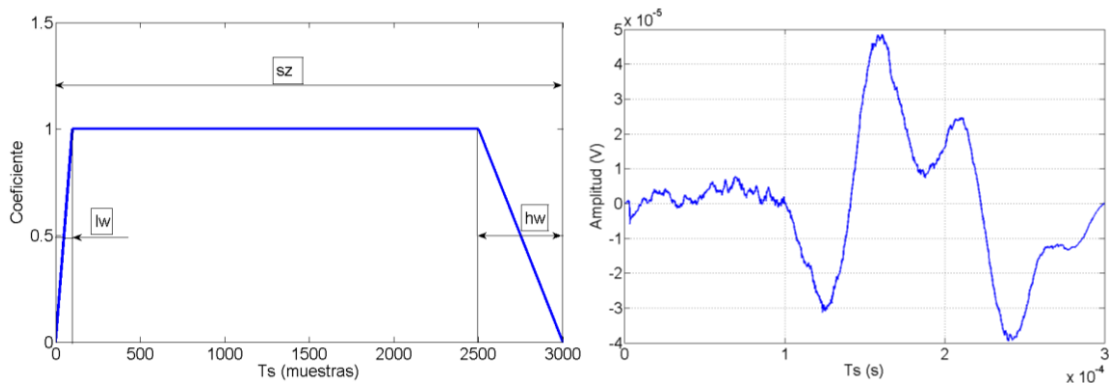


Figura 20a y 20b Ventana trapezoidal que multiplica la señal filtrada y señal tratada con  $T_c=300$  min para SCM

## 5.8 Cálculo de la curva de velocidad

El software de Freshcon detecta el tiempo de llegada de todas las señales tratadas y considerando la distancia por defecto entre emisor y receptor y el tiempo de calibración calculado previamente, calcula la curva de velocidad de la onda longitudinal. En este software esta implementado el algoritmo AIC.

## 5.9 Corrección de la curva de velocidad

La curva de velocidad obtenida utilizando el software implementado en Freshcon debe ser corregida de tres maneras distintas:

1. El retraso introducido en el filtro causal es restado al tiempo de llegada calculado previamente.
2. La velocidad es calculada considerando la distancia real entre emisor y receptor medida en el laboratorio y no con la distancia que por defecto considera software de Freshcon.
3. La curva de velocidad es limpiada manualmente para eliminar picos, causados por ejemplo por un incorrecto registro de la señal recibida u otros motivos.

La *Figura 21* muestra una curva de velocidad final para un SCM. Como se puede observar la curva sigue el comportamiento general descrito en el *Capítulo 2.3*, pero dicha curva de velocidad es irregular y tiene pequeños abombamientos. La curva de velocidad obtenida con Freshcon puede considerarse más una banda que una curva propiamente dicha. Nótese que con este tratamiento de datos se han obtenido resultados de velocidad con valores de  $T_c$  de hasta menos de 30 minutos, valores mucho más bajos de los 400 minutos anteriores al desarrollo del método o los 250 minutos en los que es posible determinar la llegada de la señal manualmente.

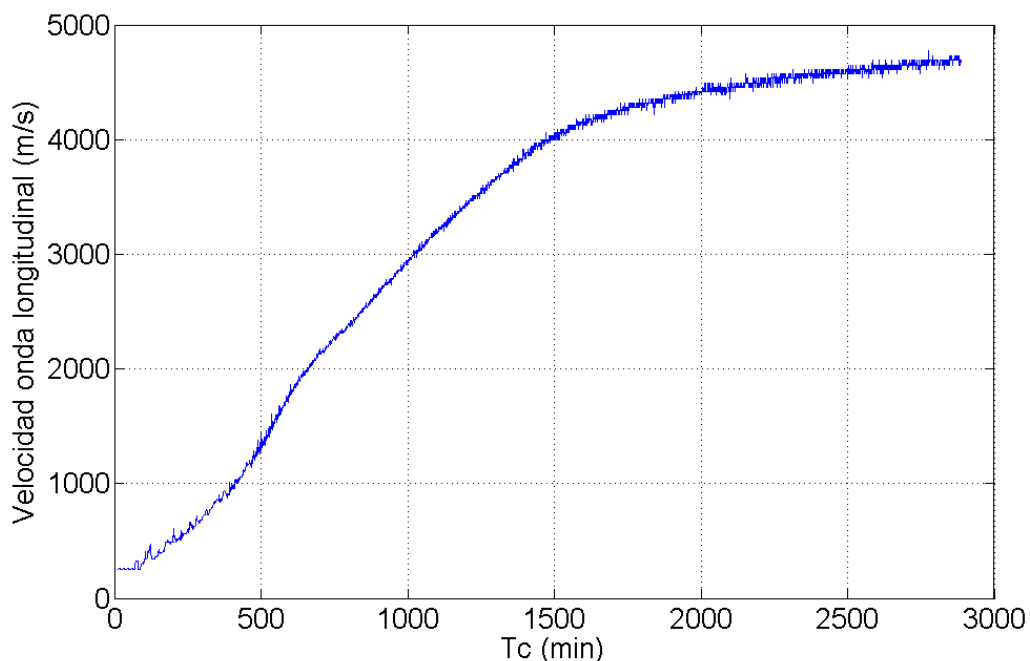


Figura 21 Curva de velocidad típica obtenida con el dispositivo de US Freshcon tras el tratamiento de datos

## 5.10 Resultados

Una vez obtenida la curva de velocidad es necesario comprobar si el resultado se ajusta con la curva de velocidad manual tomada como referencia en el *Capítulo 4.5*. Como puede comprobarse en la *Figura 22* la curva de velocidad obtenida con el algoritmo AIC usando las señales tratadas se ajusta a la curva de referencia. En los pocos casos en los que la correspondencia es errónea, se debe a una diferencia de solo de un error de una muestra en el tiempo de llegada y estos errores suceden en el segundo día de ensayos US zona alejada del punto de inflexión de la curva. La curva de velocidad obtenida a partir de los datos tratados siempre mejora el comportamiento de la curva obtenida a partir de los originales, obteniendo valores de velocidad superiores debido al menor retraso en la detección de la llegada de la señal US.

Además, mientras que trabajando con los datos originales es imposible determinar valores de velocidad en señales con  $T_c$  menor que 400 minutos, zona próxima a la zona del punto de inflexión de la curva, con este nuevo tratamiento se pueden obtener valores de velocidad tras pocos minutos del comienzo del test. Es decir, que gracias a este hecho es posible de determinar el máximo gradiente de una curva de velocidad con forma de S de manera precisa.

Por tanto el método desarrollado para el tratamiento de datos del dispositivo Freshcon, soluciona los problemas que existían en la determinación del tiempo de llegada de la señal US, y permite obtener una curva de velocidad con valores para todo  $T_c$  que se corresponden con la curva obtenida con la detección manual de los tiempos de llegada, la mejor referencia que se dispone. Esto permite calcular el parámetro importante en el estudio de la hidratación del cemento en hormigones y morteros, el punto de inflexión de la curva o el tiempo de comienzo de percolación de los productos de hidratación del cemento.

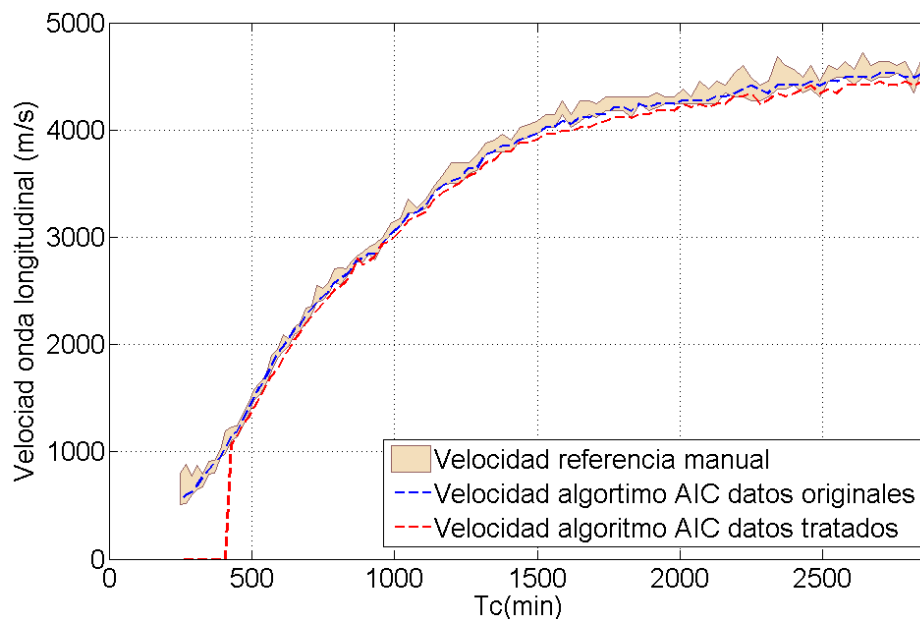


Figura 22 Curva de velocidad tras el tratamiento comparada con las curvas de referencia y la anterior al tratamiento

## 5.11 Obtención del punto de inflexión de la curva de velocidad

Como ya ha sido mencionado anteriormente el parámetro a estudiar en esta investigación es el punto de inflexión de la curva de velocidad de la onda longitudinal. Si se calcula directamente la derivada de la curva obtenida por el método descrito anteriormente, el resultado no es válido para determinar el punto de inflexión de la curva, ya que como la curva es irregular, su gradiente es todavía más irregular. Por tanto es necesario ajustar una curva suave que se ajuste a los resultados de velocidad obtenidos con Freshcon.

En el marco global de la investigación sobre SCC en la Academia Militar de Bélgica en la que se engloba este proyecto, se desarrolló un proyecto fin de máster en paralelo a este trabajo con el objetivo de ajustar curvas de velocidad suaves a resultados de velocidad obtenidos con diferentes aparatos de ensayos con US para hormigón y mortero. Se estudió la aplicación de diferentes curvas de naturaleza polinómica, spline o logística entre otras. Los mejores resultados y más fiables y robustos se obtuvieron ajustando curvas de naturaleza logística, ajustando una curva combinación de 3, 5 o 7 curvas logísticas.

Una función logística es una función característica muy utilizada en los dominios de la economía, la biología o la medicina. Pertenece a la familia de las curvas sigmoides. Los valores de la curva logística simple vienen dados por la fórmula:

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}}$$

Se ha observado que esta curva se aproxima a la curva de velocidades obtenidas con dispositivos de monitorización con US, pero para ello es necesario introducir nuevos parámetros. La curva resultante es conocida como la función de Boltzmann:

$$v(t) = \frac{v_1 - v_2}{1 + e^{-\frac{(t-t_0)}{dt}}} + v_2 \quad \text{con} \quad dt = \frac{v_1 - v_2}{4 \max(dv)}$$

donde  $v_1$  es la velocidad inicial,  $v_2$  es la velocidad final y  $t_0$  es el punto central situado entre  $v_1$  y  $v_2$ . Combinando 3, 5 y 7 curvas de este tipo se obtienen los mejores resultados para el ajuste de una curva de suavizado los resultados obtenidos con el dispositivo Freshcon [6][17].

En la *Figura 23a* se observa la curva de velocidad obtenida con Freshcon y la curva ajustada de naturaleza logística. En la *Figura 23b* se representa el gradiente de la curva ajustada, cuyo máximo es fácil de determinar y corresponde con el verdadero punto de inflexión de la curva de velocidad de la onda longitudinal. Llegados a este punto en el desarrollo del tratamientos de datos, el método ya puede aplicarse a proyectos de investigación.



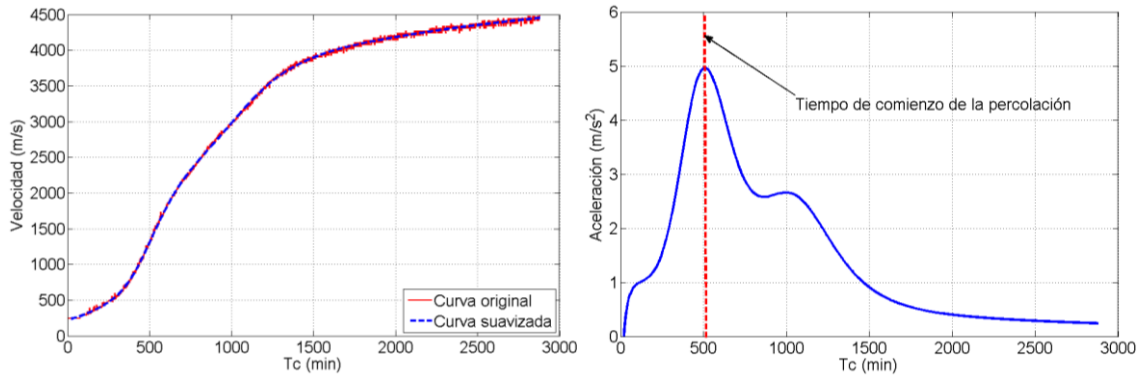


Figura 23a y 23b Curva de velocidad original y curva ajustada de naturaleza logística y gradiente de esta última para SCM

# 6. Aplicación del método desarrollado en el estudio de mortero auto-compactante

---

## 6.1 Ensayos realizados

El método automatizado desarrollado para el tratamiento de datos del dispositivo Freshcon ha sido aplicado para la caracterización de SCM que contiene cenizas volantes y SP comerciales de tipo PCE como Glenium 27 y Glenium 51. En la investigación de dichos SCM, la hidratación de las mezclas fue monitorizada por US durante 2 días y sus propiedades en estado fresco como la consistencia y fluidez mediante los slump flow test y flow test, el contenido en aire por el método manométrico y la densidad fueron estudiadas. Estos métodos están explicados en el *Anexo E.1*.

Se han realizado tres estudios paramétricos de SCM con cenizas volantes y con una composición de la mezcla fija con una relación Áridos/Cemento(A/C)=3 y Agua/Cemento(W/C)=0.45 variando los siguientes parámetros:

1. El porcentaje de SP (%SP) Glenium 51 con una relación Cemento/Polvo(C/P)=0.75 constante
2. El C/P con %SP=0.6 constante con Glenium 51
3. El porcentaje de SP Glenium 27 con C/P=0.75 constante (*Anexo E.2.3*)

Dichos parámetros varían en un rango que abarca desde que la mezcla es apenas trabajable y se puede introducir en los recipientes de trabajo manualmente con un nivel de uniformidad aceptable, hasta que aparece segregación en las mezclas. Nótese que las cenizas volantes no sustituyen al cemento en la mezcla, sino que son añadidas. En las series 1 y 3, la distancia entre emisor y receptor es de 55 mm, y en la serie 2, la distancia es de 20 mm.

En la realización de estos estudios paramétricos se ha observado que alguna de las curvas del velocidad obtenidas con Freshcon no sigue el mismo comportamiento general que el resto. Dado que estos problemas observados no tienen que ver con el tratamiento de los datos efectuado, sino con algún aspecto de la realización del ensayo en el laboratorio o algún problema desconocido en la emisión, recepción o registro de las señales US las curvas que presentan un comportamiento anormal han sido descartadas para el análisis.

## 6.2 Influencia de la variación de la cantidad de Glenium 51

Se ha observado un retraso en el proceso de hidratación (*Figura 24a*) y un incremento lineal del tiempo de comienzo de percolación con el aumento de %SP de Glenium 51 (*Figura 24b*). Este hecho se explica porque el incremento de PCE aumenta la dispersión de los granos de cemento en el SCM y por tanto la distancia entre granos. Por tanto, para que los productos

de hidratación de distintos granos de cemento entren en contacto, es necesario que transcurra un tiempo mayor. Además este aumento en el %SP, que provoca una mayor dispersión de los granos de cemento y mayor cantidad de agua liberada, produce un aumento de la fluidez, que se ve reflejado en los slump flow test y flow test (*Figura E.4*). Es decir, la adición de SP tiene como efecto principal deseado el aumento de la fluidez del mortero sin variar la relación W/C, pero tiene el efecto secundario (en principio desfavorable) de aumentar el tiempo de fraguado inicial del SCM. El aumento de %SP provoca también una reducción lineal del contenido en aire en la mezcla (*Figura E.5*), ya que las burbujas de aire pueden ascender a la superficie más fácilmente por la reducción de las fuerzas de fricción en la mezcla, y un aumento lineal de la densidad del SCM (*Figura E.6*), debida a la menor presencia de aire. Todos los resultados obtenidos se encuentran en la *Tabla E.1*.

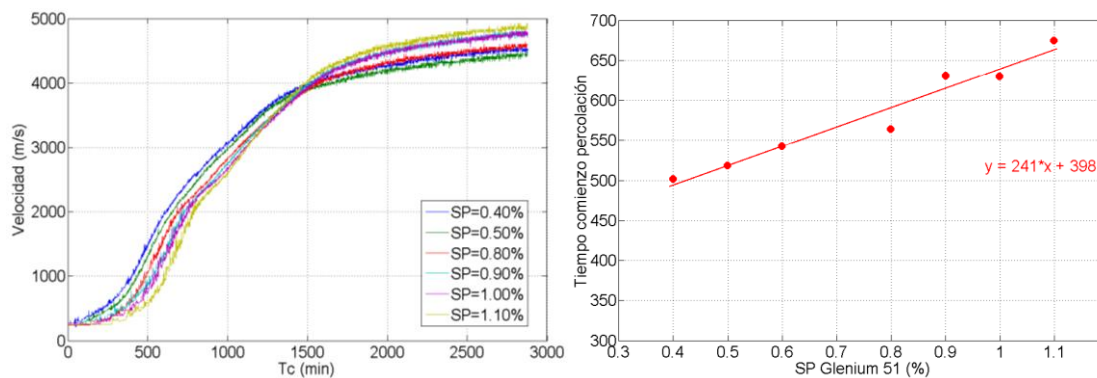


Figura 24a y 24b Curvas de velocidad de la onda longitudinal y tiempo de comienzo de percolación para SCM con diferentes %SP de Glenium 51

### 6.3 Influencia de la variación de la cantidad de cenizas volantes

Se ha observado un retraso en el proceso de hidratación (*Figura 25a*) y un incremento lineal del tiempo de comienzo de percolación con el aumento de cenizas volantes (que implica una reducción de C/P) mostrado en la *Figura 25b*. La presencia de cenizas volantes en el SCM provoca que parte de estas pequeñas partículas se interpongan entre los granos de cemento, aumentando la distancia entre ellos, y por tanto provocando un retraso en el comienzo de la percolación. Además el aumento de cenizas volantes causa una reducción de la fluidez de la mezcla ya que estas absorben agua en su superficie reduciendo la cantidad de agua libre en la mezcla, como puede observarse en los resultados de los slump flow test y flow test (*Figura E.8*). Es decir, una reducción en la cantidad de cenizas volantes tiene como efecto principal deseado un aumento de la fluidez del SCM, y el efecto secundario (en principio favorable) de reducir el fraguado inicial del mortero. Por el contrario, la reducción de la cantidad de cenizas volantes disminuirá previsiblemente la resistencia del mortero a largo plazo, que las cenizas volantes aportan adicionalmente en su proceso de hidratación. La menor disposición de agua libre impide a las burbujas de aire subir a la superficie debido al aumento de las fuerzas de fricción en la mezcla, aumentando linealmente la cantidad de aire en la mezcla (*Figura E.9*) y reduciendo linealmente su densidad (*Figura E.10*) respecto a la relación C/P.

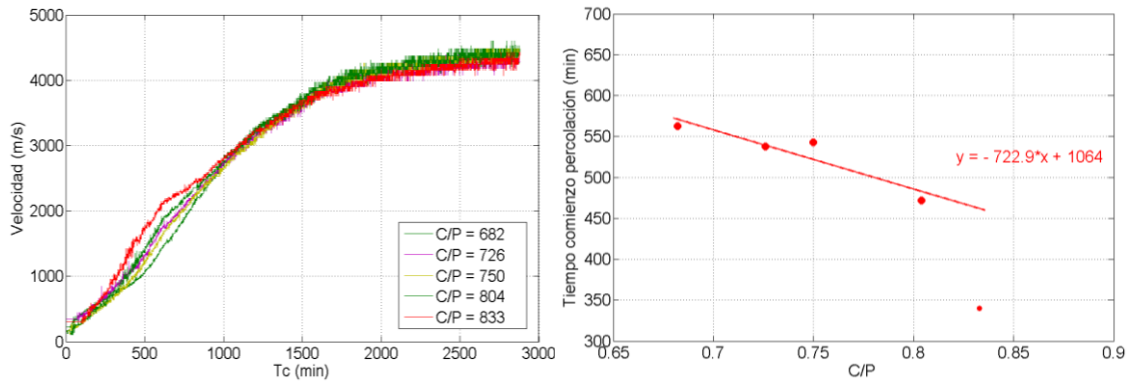


Figura 25a y 25b Curvas de velocidad de la onda longitudinal y tiempo de comienzo de percolación para SCM con diferentes C/P con Glenium 51

# 7. Conclusiones

---

En este proyecto se ha desarrollado y aplicado con éxito un método automático para el tratamiento de datos del dispositivo de US Freshcon. Como paso previo al desarrollo del método, se ha estudiado la naturaleza de las señales US recibidas a lo largo de un test. Además se ha estudiado el método de tratamiento de datos previo a este trabajo, consistente en la detección del tiempo de llegada de la señal US mediante el algoritmo AIC implementado en el software de Freshcon. Los problemas que presenta este tratamiento y sus causas, así como a los errores que causan en la curva de velocidad, han sido analizados.

Teniendo presente la naturaleza de las señales US y el algoritmo de detección de su llegada, un método automático ha sido desarrollado para optimizar el tratamiento de datos de Freshcon. El método está basado en el filtrado de señales con un filtro Bessel de paso bajo para reducir la amplitud del ruido de la señal, y en todo momento se ha intentado preservar la forma de la señal US recibida modificando los elementos que causaban problemas en la labor del algoritmo AIC como el disparador. La validez del método ha sido comprobada comparando los resultados con una curva de velocidad tomada como referencia donde el tiempo de llegada ha sido detectado manualmente.

El método desarrollado ha sido aplicado numerosas mezclas de SCM compuesto por cenizas volantes y PCE, con muy diferentes propiedades en estado fresco, y se ha mostrado efectivo y robusto obteniendo resultados consistentes perfectamente explicables por la microestructura del SCM.

En el futuro diversas líneas de trabajo podrían o deberían ser desarrolladas:

- Análisis de SCM con combinaciones diferentes de adiciones minerales y SP, así como agentes aceleradores o retardadores, haciendo si fuera necesario pequeños ajustes en el método desarrollado para su óptimo funcionamiento.
- Análisis de los problemas que a veces provocan curvas de velocidad anormales y de sus causas hasta ahora desconocidas.
- Estudio de repetibilidad y reproducibilidad de las curvas de velocidad de mortero tradicional o de SCM con adiciones inertes para determinar la precisión del dispositivo US.
- Comparación de los resultados obtenidos con Freshcon con los resultados del dispositivo de US monofrecuencial IP8 disponible.
- Relación de parámetros en el estado fresco con parámetros de la curva de velocidad de la onda longitudinal, por ejemplo la velocidad inicial con el contenido en aire de la mezcla.
- Análisis de la hidratación del cemento basada en la amplitud y el espectro frecuencial de la onda recibida

Este proyecto fin de carrera ha sido desarrollado en Departamento de Construcción y Materiales de la Real Academia Militar de Bélgica entre los meses de Julio y Diciembre de 2010 gracias al programa internacional de becas para estudiantes de universidades españolas Faro

Global dependiente del Ministerio de Educación. En el plano personal, la realización de este proyecto fin de carrera en la Real Academia Militar de Bélgica me ha servido para tener una primera toma de contacto con el mundo de la investigación, y ha sido una experiencia a caballo entre el mundo académico y el profesional. En la realización de este proyecto se han puesto en práctica gran cantidad de los conceptos aprendidos durante la carrera en diversas áreas, tanto teóricos como prácticos en el laboratorio. El hecho de tener que no solo solucionar un problema real cuya solución no es ni única ni evidente, sino también tener que plantearlo y justificar con rigor las soluciones adoptadas y los resultados obtenidos, me ha servido para tener consciencia de la complejidad de los problemas fuera del ámbito académico.