



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



Caracterización de la recuperación de las propiedades mecánicas en hormigones autosanables. Aplicación práctica en una nave industrial en Benifaió, Valencia.

Memoria

Trabajo final de grado – Tipo II

Grado en Ingeniería de obras Públicas
Curso: 2016/17

Autor: Laura Rubio Garde

Tutor: Pedro Serna Ros

Tutora Experimental: Marta Roig Flores

Valencia, junio de 2016

Índice.....	2
Capítulo 1. Introducción.....	4
1.1 Introducción.....	4
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estructura del documento	5
Capítulo 2. Estado del arte	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 El fenómeno del Autosanación (Self-Healing).....	8
2.2.1 Autosanación en la naturaleza.....	8
2.2.2 Definiciones de Autosanación (Self-Healing)	8
2.3 Sanación Autógena (Autogenous Healing)	10
2.3.1 Mecanismos de la Sanación Autógena.....	10
2.3.2 Potenciación de la sanación autógena.....	15
2.3.3 Resumen sobre la sanación autógena.....	20
2.4 Sanación Autónoma (Autonomous Self-Healing)	21
2.4.1 Clasificación y métodos de sanación autónoma.....	21
2.4.2 Métodos de introducción.....	22
2.4.3 Agente sanador y catalizador	24
2.4.4 Resumen sobre la sanación autógena.....	36
2.5 Métodos de evaluación de la recuperación de las capacidades mecánicas	37
2.5.1 Conceptos previos sobre hormigón reforzado con fibras.....	37
2.5.2 Método según borrador del CEN/TC 104 N 1404	39
2.5.3 Metodología según investigaciones de Liberato Ferrara	42
2.5.4 Metodología según investigaciones de S. Z. Qian, J. Zhou y E. Schlangen	45
2.5.5 Conclusiones	45
Capítulo 3. Fase experimental.....	46
3.2 Programa experimental.....	46
3.3 Fabricación de los hormigones	49
3.3.1 Materiales.....	49
3.3.2 Dosificación	59
3.3.3 Proceso de fabricación	62
3.4 Ensayos de caracterización de los hormigones.....	67
3.4.1 Ensayo de control sobre hormigón fresco.....	67
3.4.2 Ensayo de control sobre hormigón endurecido.....	69

3.4.3 Ensayo a flexotracción según UNE-EN modificado.....	70
3.5 Estudio de la capacidad de autosanación (Self-Healing).....	74
3.5.1 Metodología del ensayo de flexión a 3 puntos.....	76
3.5.2 Metodología para el cálculo de resultados.....	81
Capítulo 4. Resultados y discusión	86
4.1 Resultados de ensayos de caracterización	86
4.1.1 Ensayos de consistencia.....	86
4.1.2 Ensayos de compresión.....	87
4.1.3 Ensayo de caracterización de los hormigones con fibras a flexotracción.....	91
4.1.4 Conclusiones.....	93
4.2 Resultados de los ensayos para la evaluación de la sanación (SH)	94
4.2.1 Resultados para la carga pico.....	94
4.2.2 Resultados del cálculo de pendientes.....	95
4.2.3 Evaluación de la sanación (SH).....	107
4.2.4 Conclusiones sobre la sanación de las fisuras.....	112
Capítulo 5. Aplicación práctica.....	114
5.1 Introducción.....	114
5.2 Localización.....	114
5.3 Descripción.....	115
5.4 Suposición de reparación de las fisuras	119
5.5 Alternativa de introducción de aditivos cristalinos en el hormigón	120
5.6 Comparación económica	121
5.7 Conclusiones.....	121
Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas	122
6.1 Conclusiones.....	122
6.2 Futuras líneas.....	122
Referencias	124
Anejo.....	128

1.1 Introducción

La sostenibilidad es un factor que cada vez cobra más importancia en la sociedad debido a la limitación de recursos.

Con los avances tanto en la investigación, como en la obtención de materiales de muy altas calidades y prestaciones y la mejora en los procesos de fabricación de los productos, la sociedad avanza hacia materiales y procesos capaces de superar los límites establecidos hasta ahora, tanto en términos de vida útil, como en prestaciones. Un ejemplo de ello es la obtención de materiales inteligentes.

Esta tendencia se ha arraigado también en el ámbito de la construcción debido a la necesidad de obtener estructuras seguras, duraderas y sostenibles. Sin embargo, las estructuras de hormigón (tipología más utilizada en España) suelen presentar patologías a lo largo de su vida útil que pueden comprometer estos objetivos y cuya reparación puede suponer grandes costes.

Todos estos factores hacen que en el ámbito de la construcción se estén realizando investigaciones con la finalidad de obtener materiales inteligentes capaces de sanar estas patologías, prolongando su vida útil y reduciendo costes de mantenimiento. Es el caso de los materiales autosanables y más en concreto de los hormigones autosanables.

La autosanación consiste en la recuperación de propiedades por parte del material de forma autónoma. Algunos autores diferencian entre autosanado y autorreparación, siendo la primera la recuperación de la resistencia, rigidez e impermeabilidad y la segunda sólo la recuperación de la impermeabilidad. Sin embargo, el término autosanado se suele utilizar para referirse a ambos procesos indiferentemente.

Para conseguir el autosanado del hormigón, se ha investigado desde la introducción en su matriz de aditivos hasta la de bacterias y se espera que en un futuro se puedan aplicar estas técnicas al hormigón estructural. La obtención de este hormigón autosable sería de especial interés en estructuras enterradas o de difícil acceso (como tuberías o cimentaciones), estructuras diseñadas para una vida útil elevada (presas o túneles), así como estructuras que requirieran una buena impermeabilización.

En este documento se analiza uno de los métodos desarrollados en los últimos años para el diseño de hormigones autosanables: los aditivos cristalinos.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este proyecto es estudiar la recuperación de las propiedades mecánicas en hormigones autosanables con aditivos cristalinos.

Los objetivos específicos son:

- Diseño de una metodología experimental para la evaluación de la recuperación de propiedades mecánicas debidas a la sanación autógena y a la autónoma mediante ensayos de flexión.
- Evaluar la influencia del daño inicial en la autosanación, dependiendo de la abertura de fisura inicial.

- Evaluar la influencia de la cantidad de cemento en la capacidad de autosanado del hormigón.
- Evaluar la influencia de la cantidad de fibras en la sanación del hormigón.
- Comparación de la sanación autógena de cada hormigón con la autónoma conseguida gracias al uso de aditivos cristalinos.
- Evaluar el uso de aditivos cristalinos como potenciadores de la sanación del hormigón.

La idea principal se centrará en el desarrollo de la metodología y la verificación de la efectividad del uso de los aditivos cristalinos, y por otra parte, en la detección de una forma cualitativa de si el fenómeno de autosanación llega a ser viable desde el punto de vista mecánico.

1.3 Estructura del documento

Este documento está organizado en 6 capítulos:

- Capítulo 1 es un capítulo introductorio donde se explican los objetivos y la estructura del documento.
- Capítulo 2 recopila las investigaciones realizadas hasta la actualidad que se han considerado más relevantes sobre el autosanado del hormigón y los diferentes métodos para evaluar la recuperación de propiedades mecánicas.
- Capítulo 3 incluye los objetivos específicos y describe el programa experimental y la metodología seguida en este proyecto para evaluar la autosanación del hormigón.
- Capítulo 4 expone los resultados de los ensayos realizados tanto de control como para evaluar la recuperación de propiedades mecánicas del hormigón.
- Capítulo 5 se desarrolla la aplicación práctica.
- Capítulo 6 se exponen las conclusiones y las futuras líneas de investigación.

2.1 Introducción

El hormigón es el material más utilizado en el sector de la construcción por su elevada resistencia, su versatilidad, la economía que presenta frente a otros materiales, su estabilidad y su facilidad de puesta y manejo en obra.

Sin embargo, su resistencia a tracción es aproximadamente el 10% de su resistencia a compresión por lo que es necesario suplir esa carencia de resistencia introduciendo en el hormigón barras o fibras de acero. Aún con esta ayuda, el hormigón es propenso a la aparición de fisuras que, ya sean fisuras por variaciones térmicas, por variaciones de humedad o por un exceso de carga, pueden suponer un acceso a la matriz del hormigón de líquidos y gases potencialmente agresivos presentes en el ambiente y una reducción de la rigidez y la resistencia de la estructura debido a la reducción de su sección resistente.

Generalmente, pequeñas fisuras en servicio son comunes y no suelen suponer grandes inconvenientes, pero hay situaciones en las que la aparición de una fisura puede ser muy problemática. Un ejemplo de esto son las estructuras con niveles de seguridad muy elevados, donde la fisuración puede significar la pérdida de resistencia del hormigón y la corrosión de las armaduras o los problemas de estanqueidad que pueden surgir en estructuras donde esta característica es importante. Estos efectos de las fisuras sobre ciertas estructuras pueden llevar a la interrupción o incluso paralización del servicio de la estructura acortando su vida útil o incluso a su completa degradación y colapso con el riesgo que ello conlleva.

Es por tanto necesaria la actuación sobre estas fisuras, sin embargo muchas veces tanto la detección de ellas como su posterior reparación es dificultosa debido a que se encuentran en zonas no visibles o poco accesibles de la estructura y que además, pueden ser las más peligrosas (como en el caso de las cimentaciones).

Además, en algunas situaciones estas reparaciones pueden llegar a suponer un elevado coste directamente (dado a su intensidad) o indirectamente por la paralización de actividades económicas a las que la infraestructura estaba destinada.

La propuesta de hormigones autosanables nace por tanto como respuesta a la necesidad de que el hormigón cierre fisuras de la forma más económica, segura, duradera y ecológica posible.

La calificación de hormigón autosanable es relativamente reciente pero no lo es su capacidad pues por sí mismo el hormigón convencional tiene mecanismos para cerrar sus microfisuras debido a las propiedades que presenta su matriz.

Comúnmente se ha considerado que las primeras observaciones de este fenómeno se realizaron en 1836 por la Academia Francesa de la Ciencia [1]. Posteriormente muchos autores han tratado de encontrar evidencias científicas a este proceso, entre ellos Edvardsen quien realizó un completo estudio sobre estas deposiciones de carbonatos. [2]

Esta sanación que presenta el hormigón sin intervención alguna nada más que por los componentes de su matriz y siempre en presencia del agua, se denomina Sanación Autógena (*Autogenous Healing*) [3] [4] y está basada fundamentalmente en la continua hidratación de las partículas sin hidratar del clínker y en la carbonatación y posterior deposición de los óxidos de calcio presentes en el hormigón.

Sin embargo, esta capacidad de autosanado intrínseco del hormigón es poco fiable e insuficiente para solucionar los problemas de fisuras que surgen durante la vida útil de las estructuras de hormigón, por lo que se ha abierto una línea de investigación para conseguir mejorar y potenciar estos mecanismos naturales que presenta el hormigón mediante el uso de aditivos y otros productos, de forma que el hormigón autosanable pueda ser una alternativa a la reparación.

En este capítulo, el Estado del Arte, se abordarán los estudios que se consideran más influyentes y relevantes sobre la autosanación del hormigón hasta la actualidad.

2.2 El fenómeno del Autosanación (Self-Healing)

2.2.1 Autosanación en la naturaleza

En la naturaleza se pueden encontrar materiales que diariamente emplean sus propiedades de autosanación. Es el caso de la piel, la concha de los caracoles o los huesos.

En el caso de los huesos, su comportamiento es anisótropo, viscoelástico y al igual que el hormigón, presenta mayor resistencia a los esfuerzos de compresión que a los esfuerzos de tracción [5]. Durante su vida el hueso presenta un equilibrio entre las células que degradan y reabsorben el hueso viejo (osteoclastos) y las que crean, mantienen y reparan el hueso (osteoblastos). Sin embargo, cuando el hueso está sometido a una tensión mayor que su resistencia y se produce su rotura hay un desequilibrio que para el ciclo normal de actuación de estas células y se dan una serie de reacciones cuya consecuencia es el sanado de la fractura de una forma rápida y eficaz. Este sanado se produce únicamente mediante los mecanismos que genera el cuerpo, a partir de un catalizador que es la rotura y tendrá como resultante el sellado de la fractura con nuevo material óseo, dotando al hueso sanado de la misma rigidez y resistencia que tenía antes de dañarse.

Al igual que muchos inventos se han inspirado en procesos presentes en la naturaleza, el objetivo del hormigón autosanable es que sea capaz de imitar un comportamiento semejante al del hueso: que sea capaz de generar un material que reemplace el dañado y además que su conjunto recupere las propiedades que le eran inherentes antes de que se produjera el daño.

2.2.2 Definiciones de Autosanación (Self-Healing)

Como se ha introducido ya anteriormente, el hormigón también tiene la capacidad de sanar sus fisuras por sí mismo a causa de diferentes mecanismos que se expondrán en el capítulo 3.1 “Mecanismos de la Sanación Autógena” de este proyecto.

Este proceso llamado Autosanado o Self-Healing / Repairing se define por el Japan Concrete Institute (en adelante JCI) [1] como un “proceso de relleno y sellado de las fisuras que automáticamente tiene lugar “in situ” y no es resultado de ningún trabajo exterior”. El Autosanado (*Self-Healing / Repairing*) del hormigón según la definición del JCI puede clasificarse en Sanado Autógeno (*Autogenous Healing*) y Sanado Diseñado (*Engineered Healing*) (ver Figura 1).

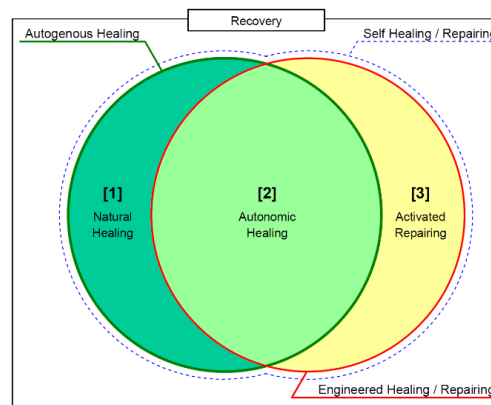


Figura 1. Diagrama de Venn de tipos de autosanado según JCI TC-075B.

En cambio, The RILEM Technical Committee 221-SHC (Self-Healing phenomena in cement-based materials) [4] lo define de la siguiente forma: “Cualquier proceso hecho por el propio material que suponga la recuperación y por consiguiente la mejora de su funcionamiento después de una acción que haya causado la reducción de su rendimiento”. Clasifican así mismo el proceso de Autosanación en dos subprocesos diferenciados: Sanación Autogénica (*Autogenic Healing*) y Sanación Autónoma (*Autonomous Healing*).

Para ambas definiciones, este proceso puede estar basado en la capacidad que tiene el propio hormigón sin ningún aditivo o adición para producir la sanación de las fisuras (a lo que se llama como Sanación Autógena) o en la incorporación al hormigón de productos para potenciar este efecto (sanación Autónoma o Diseñada).

La Sanación Autógena del hormigón ha sido definida, a su vez, de diferentes formas por diversos autores, como se expone a continuación:

- RILEM Technical Committee 221-HSC [4]: “Se habla de un proceso de sanado autógeno cuando el proceso de recuperación de propiedades usa materiales que podrían estar presentes aún cuando no se hubiera diseñado el material específicamente para el autosanado o *Self-Healing*”.
- JCI Technical Committee on Autogenous Healing in Cementitious Materials (JCI 2009): “Proceso natural de relleno y sellado de las fisuras sin operaciones ni trabajos externos”.
- ter Heide [6] asegura que “Autogeno” enfatiza que el hormigón sana sin ninguna ayuda exterior.

En este caso la Sanación Autógena es un proceso de relleno y sellado que se da de forma natural en las fisuras. Este proceso resulta de algunas reacciones químicas (por ejemplo la hidratación y la carbonatación) o el bloqueo mecánico en las caras de la fisura en el hormigón y materiales cementosos.

En cambio, la Sanación Autónoma es la sanación de las fisuras que se genera por el uso de adiciones en el hormigón. Estas adiciones como cenizas volantes o agentes expansivos se colocan con antelación de forma intencionada en la matriz de hormigón.

Varios autores diferencian entre autosanación y autosellado, siendo la autosanación la recuperación de las propiedades mecánicas y el autosellado la recuperación de la impermeabilidad.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, la autosanación o *Self-Healing* se podría definir como un proceso mediante el cual el hormigón fisurado es capaz de generar mecanismos que rellenen las fisuras de forma que el conjunto recupere las propiedades aislantes y las capacidades mecánicas que tenía antes de fisurarse. Estos mecanismos pueden ser resultado de los componentes propios del hormigón o de una adición específicamente añadida a la matriz para producir la sanación.

2.3 Sanación Autógena (Autogenous Healing)

2.3.1 Mecanismos de la Sanación Autógena

No se ha establecido de forma concluyente los mecanismos por los que el hormigón presenta una capacidad intrínseca de sanación [2].

En 1968 Loving [7] observó depósitos de carbonatos cálcicos en las fisuras de sus cultivos y postuló ya la reacción de carbonatación.

Actualmente Kim Van Tittelboom y Nele De Belie lo atribuyen principalmente a la continua hidratación de las partículas de cemento sin hidratar y a la disolución y subsecuente carbonatación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [3].

Ter Heide [6] los relaciona con las siguientes causas en el caso de elementos en contacto con agua (ver Figura 2).

- 1. Precipitación de cristales de carbonato cálcico sobre las paredes de la fisura.
- 2. Sedimentación de partículas.
- 3. Hidratación de la pasta de cemento que permanece sin hidratar.
- 4. Aumento de volumen de la matriz de cemento por saturación.

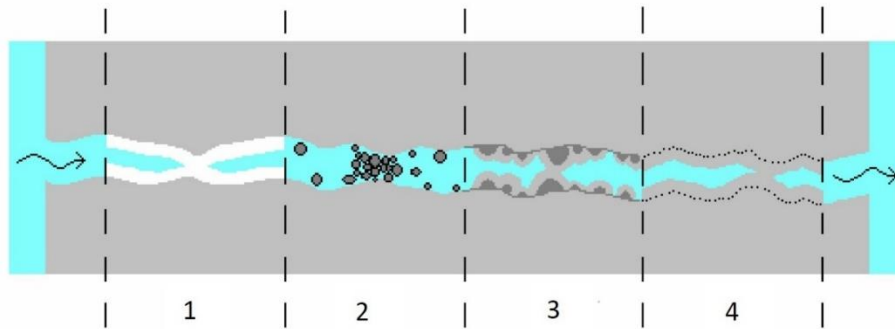


Figura 2. Posibles causas de la sanación autógena del hormigón. 1 Formación de carbonato cálcico o hidróxido de calcio; 2 Sedimentación de partículas; 3 Hidratación continuada; 4 Aumento de volumen de la matriz de cemento, [6].

A continuación se explican en más detalle los mecanismos que se consideran principales [3], [6]: la formación de carbonato cálcico y la hidratación de la pasta de cemento no hidratada.

2.3.1.1 Formación de carbonato cálcico

Este mecanismo consiste en la cristalización y deposición de cristales de carbonato cálcico en las paredes de la fisura, lo que dará lugar a su relleno y sellado. El proceso se muestra en la Figura 3.

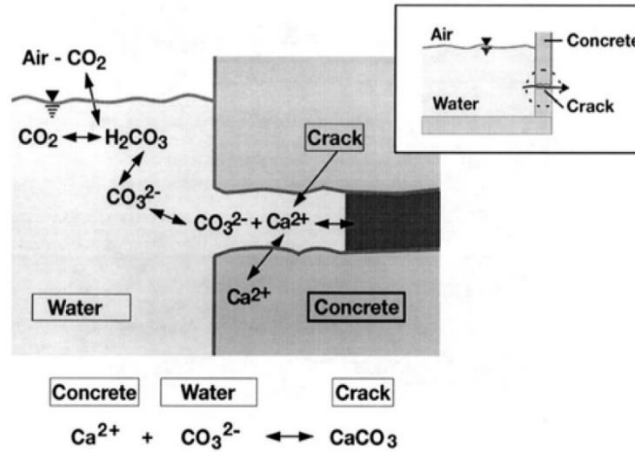
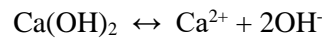


Figura 3. Medio, relaciones y reacciones en un sistema CaCO₃-CO₂-H₂O, [6].

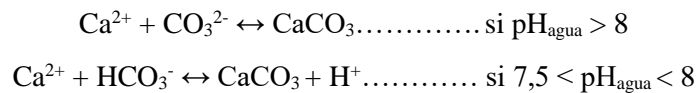
El hidróxido de calcio Ca(OH)₂ es un producto de la reacción de hidratación del hormigón. De este producto, el calcio se puede liberar quedando su ión Ca²⁺:



Cuando el agua contiene dióxido de carbono CO₂ se da como producto CO₃²⁻:



Al tener en el medio Ca²⁺ y CO₃²⁻ disponible, se puede dar la reacción de carbonatación cuyo producto será carbonato cálcico CaCO₃, dependiendo del pH del agua [2]:



El carbonato cálcico no es soluble en agua por lo que sedimentará y se depositará en las caras de la fisura y la cerrará de forma progresiva (Figura 4).



Figura 4. Trazos blancos de carbonato cálcico en las fisuras, [2].

En 1999 Edvardsen [2] hace un intenso estudio sobre este mecanismo de Sanación Autógena, comparando cómo influye el pH del agua, su presión, su temperatura, el tiempo de inmersión en agua y la abertura de fisura en el proceso de formación de cristales de carbonato cálcico.

En su investigación señala que el aumento de la temperatura y del pH del agua son circunstancias que favorecen la precipitación de carbonato cálcico en las fisuras debido a la naturaleza de la formación de estos cristales.

Al analizar en profundidad el crecimiento de cristales de carbonato cálcico Edvardsen llega a la conclusión de que se dan dos crecimientos diferentes de cristales determinados por los cambios químicos y de las condiciones físicas de la fisura: En la fase inicial de la exposición al agua los iones de Ca^{2+} están presentes en las paredes de la fisura en cantidades suficientes para la carbonatación por lo que el crecimiento de estos cristales está controlado en superficie.

A medida que los iones de calcio se van agotando, se transportan mayores cantidades de iones de Ca^{2+} desde el interior del hormigón a las caras de las fisuras mediante un proceso de difusión para poder producirse la carbonatación. Este crecimiento es el controlado por difusión (ver Figura 5).

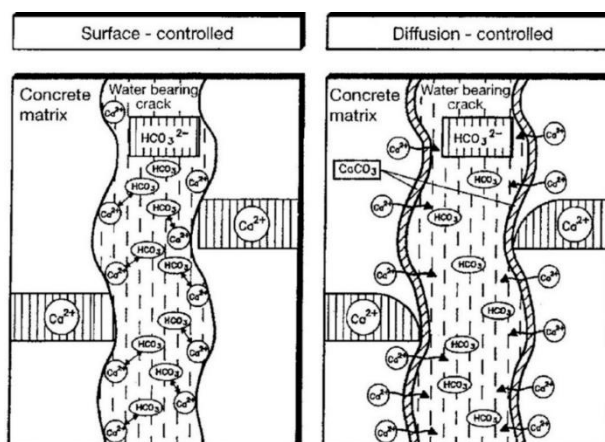


Figura 5. Proceso de crecimiento de calcita controlado por superficie (Surface-Controlled) y controlado por difusión (Diffusion-Controlled), [2].

Como consecuencia de esto, mientras haya suficientes iones de Ca^{2+} en las paredes de la fisura tendrá lugar un crecimiento de cristales muy rápido, mientras que después de que se agoten estos iones de calcio la formación de cristales que sanen la fisura dependerá de la velocidad de difusión de los iones de Ca^{2+} a través del hormigón.

Con esta caracterización del proceso de crecimiento de los cristales de carbonato cálcico, Edvardsen explicó el peculiar comportamiento de sanación que muestran las fisuras expuestas al agua: Las fisuras a través de las cuales se hace pasar un flujo de agua presentan un crecimiento de cristales mayor durante los primeros 3 o 5 días y por tanto en esta etapa se producirá la mayor parte de la sanación autógena (Figura 6).

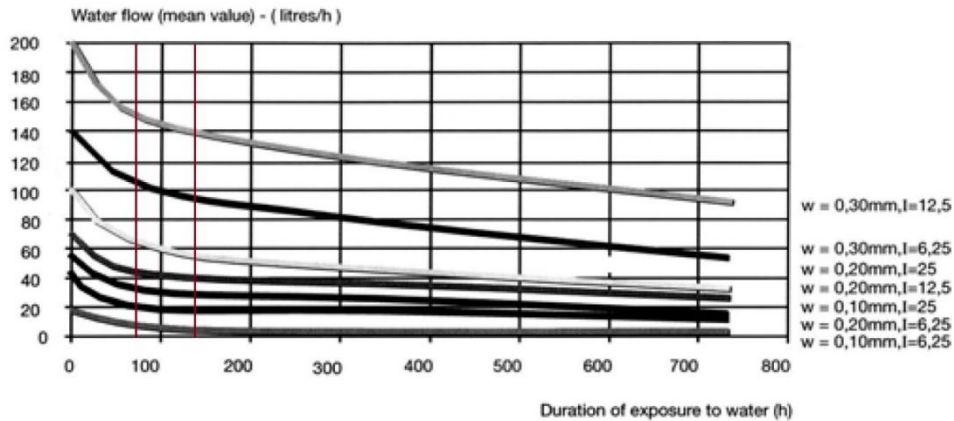


Figura 6. Gráfica que muestra la reducción de flujo que pasa a través de las fisuras con el tiempo de exposición, [2].

Edvarsen analizó también el agua y los resultados revelaron que no todo el CO_3^{2-} y HCO_3^- presente en el agua se consume en la precipitación. De esto se deduce que el contenido en carbonatos en el agua no es un factor limitante para la precipitación de CaCO_3 .

En artículos posteriores como el de Homma et al. confirmaron que los productos originados durante el periodo de curación de las fisuras de las probetas se trataban de cristales de carbonato cálcico mediante Espectroscopía Raman [8], como se muestra en la Figura 7.

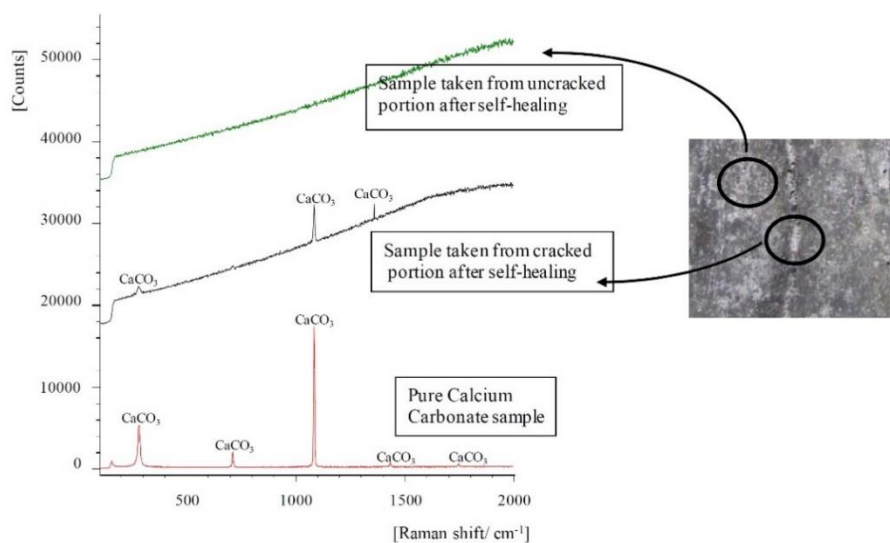


Figura 7. Espectroscopía Raman de las muestras de FRCC (PE), [8].

2.3.1.2 *Hidratación de la pasta de cemento que permanece sin hidratar y aumento de volumen de la matriz de cemento.*

Todos los productos de hidratación de los compuestos del cemento tienen densidades más pequeñas y volúmenes específicos más grandes que los compuestos de los cuales provienen. Es por ello por lo que la reacción de hidratación va acompañada de un aumento de volumen, con su consiguiente disminución de la porosidad [9].

Sin embargo, durante el proceso de hidratación del cemento no todas las partículas que forman su clinker se llegan a hidratar. Es ello por lo que sería interesante que una vez el hormigón esté endurecido y se forme una fisura, estos productos sin hidratar entren en contacto con el agua que entra por la fisura y aumenten su volumen, de forma que la fisura quede sellada (Figura 8).

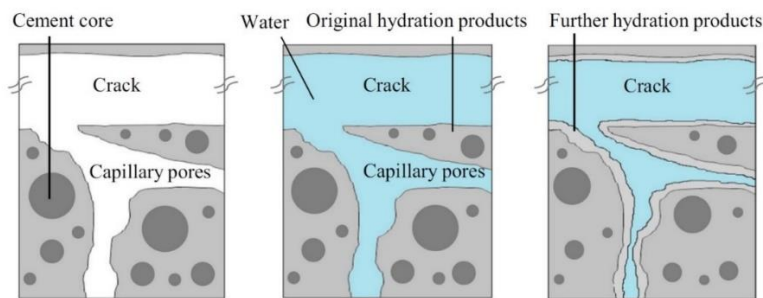


Figura 8. Esquema de la hidratación de las partículas de cemento que permanecían sin hidratar (en la pasta de cemento adyacente a las superficies de la fisura) debido al agua extra entrante a través de la fisura, [10].

Cuando las partículas sin hidratar del cemento presentes en las superficies de las fisuras entran en contacto con agua adicional las fases del clinker del cemento se disuelven. Consecuentemente, las concentraciones de varios iones en esta solución que se está formando en la fisura se incrementan de forma gradual hasta que se precipitan formando nuevos productos de hidratación en las caras de la fisura.

Huang [11] concluyó que en pastas jóvenes de cemento, grandes cantidades de cemento sin hidratar llevan a un mayor porcentaje de relleno de la fisura. Sin embargo, debe señalarse que la producción de material de relleno que sella la fisura decrece a la vez que aumenta la edad de la pasta de cemento, ralentizándose notablemente pasadas las 300 horas (12,5 días) (Figura 9).

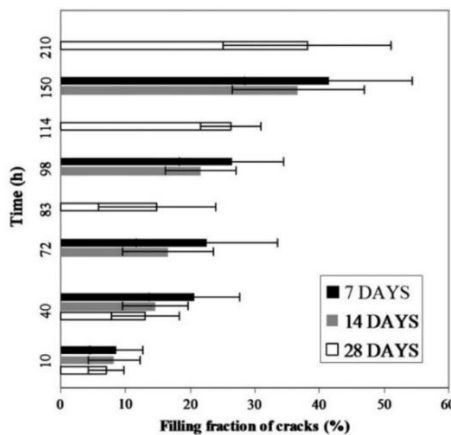


Figura 9. Influencia de la edad de la pasta de cemento en el self-healing debido a la hidratación, [11].

2.3.2 Potenciación de la sanación autógena

Este sanado autógeno puede potenciarse, por tanto, limitando o potenciando las variables que actúan sobre este proceso como son la abertura de fisura, la presencia de agua para garantizar las reacciones químicas o la adición de productos que favorezcan las reacciones de hidratación o carbonatación.

2.3.2.1 Restricción de la abertura de fisura

Distintos autores han investigado la influencia de la abertura de fisura en la sanación que experimenta la misma, llegando a la conclusión de que están estrechamente relacionados.

Edvardsen [2] observó que las muestras con aberturas de fisura menores (0,1 y 0,2 mm) sanaban con mayor facilidad al hacer pasar agua a presión a través de ellas que las probetas con apertura de fisura de 0,3 mm (Figura 10, izquierda). Reinhardt et al. [12] estudiaron la variación del flujo a una temperatura constante para diferentes aberturas de fisura y comprobaron que a menor abertura más facilidad tiene la fisura para sanarse (Figura 10, derecha).

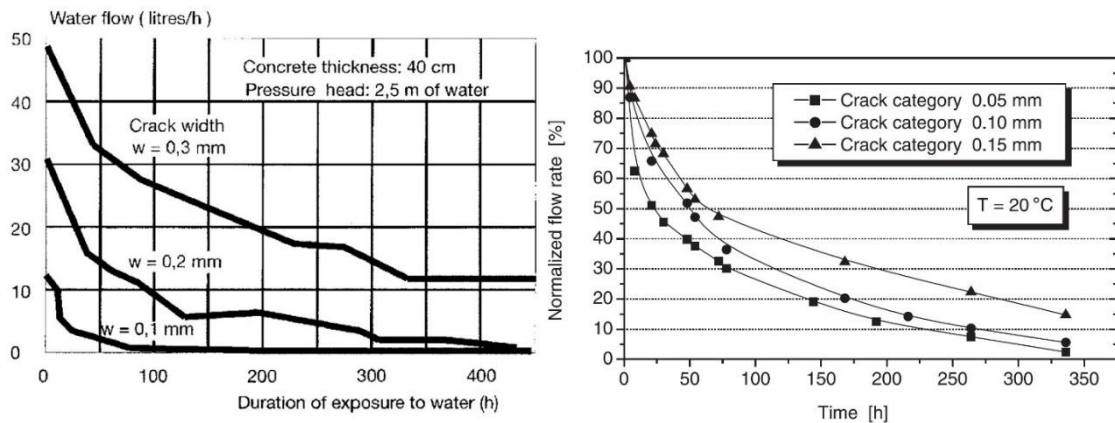


Figura 10. Reducción del flujo de agua en función de la duración de la exposición al agua para diferentes aberturas de fisura (izquierda), [2]. Reducción del flujo debido a la sanación de las fisura del HPC para varias aberturas de fisura a temperatura constante (derecha), [12].

Van Tittelboom et al. [13] observaron que las fisuras pequeñas cerraban más completa y rápidamente que las fisuras de mayores tamaños.

Dado que la abertura de fisura es un factor que influye en la capacidad de sanación del hormigón, muchos investigadores han optado por estudiar el *self-healing* en hormigones reforzados con fibras (FRCC) de forma que la variable abertura de fisura sea controlable. Además, dado que las fibras pueden ser de diversos materiales se ha estudiado también la influencia del material de la fibra en la producción y precipitación de los productos que sanan la fisura.

Tomoya Nishiwaki et al. [14] llevan a cabo un estudio donde comparan la capacidad de *self-healing* de hormigones reforzados con fibras (FRCC) en función del material de las fibras. Para el estudio deciden usar fibras sintéticas con diferentes propiedades químicas, como son las fibras de PolyVinyl Alcohol (PVA), Ethylene Vinyl Alcohol (EVOH), Poliacetal (POM) y Polipropileno (PP) y ver qué cantidad de precipitados se forman alrededor de cada tipo de fibra. En la Figura 11 se explica esquemáticamente las diferentes etapas del ensayo.

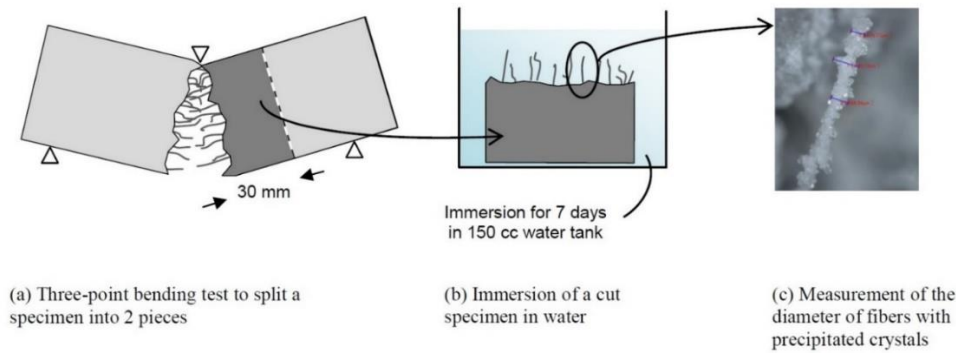


Figura 11. Procedimiento del ensayo A, [14].

Los resultados del ensayo fueron los expuestos los siguientes (ver Figura 12):

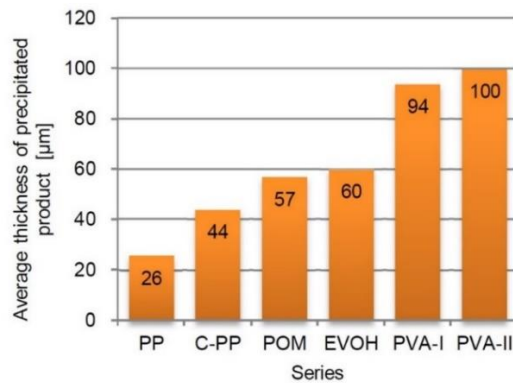


Figura 12. Espesor promedio de los productos químicos precipitados en las fibras en función del tipo de fibra, [14].

Las fibras de PP mostraron una precipitación menor, seguido de las de POM, EVOH, PVA-1 y PVA-2. Según los autores, esta tendencia corresponde al grado de polaridad que tiene el compuesto sintético, siendo que a mayor polaridad mayor atracción ejercen las fibras polarizadas hacia los iones de calcio Ca^{2+} , precipitando carbonato cálcico. También confirmaron que las fibras con secciones más complejas y un perímetro mayor proporcionan mayores cantidades de productos resultantes del proceso de sanación que aquellas fibras cuya sección es de una geometría simple. Homma et al. [8] confirmaron que las fibras que unen ambos lados de la fisura juegan un papel no solo como control de la abertura de fisura sino como una ayuda al depósito de productos resultantes de carbonatación o hidratación.

Por lo tanto, restringir la abertura de fisura supone un aumento de la sanación autógena que, además, puede potenciarse con el uso de fibras de determinados materiales y con determinadas formas.

2.3.2.2 Aporte de agua.

El agua es fundamental para que se pueda desarrollar en la fisura el proceso de *self-healing* ya que tanto las reacciones de carbonatación como la de hidratación y el arrastre de partículas sueltas procedentes del hormigón o de las impurezas presentes en el agua, necesitan de la presencia de agua en la fisura para llevarse a cabo.

En el caso de la carbonatación y precipitación de carbonatos cálcicos, el agua con dióxido de carbono dará lugar a los iones CO_3^{2-} que posteriormente unidos a los iones calcio presentes en el agua cercana a la fisura en la matriz del hormigón formarán los precipitados de carbonatos cálcicos.

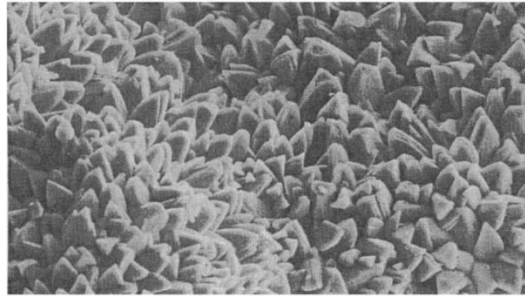


Figura 13. Cristales de calcita depositados en una cara de la fisura, [4].

Respecto a la hidratación continuada, las partículas que han permanecido sin hidratar en la matriz de hormigón son las que, una vez haya aparecido la fisura, al entrar el agua a través de ella se hidratarán y la sanarán.

Es por ello tan importante garantizar la presencia de agua en la fisura para garantizar la sanación. Varios autores han investigado sobre las características del agua que pueden influir en el proceso de *self-healing*, tales como la temperatura del agua, su presión y su dureza.

Reinhardt [12] analiza el proceso de *self-healing* mediante un test de permeabilidad en un hormigón de alta resistencia (HPC) en función de la temperatura del agua, estando la abertura de fisura entre los valores de 0,05 y 0,2 mm. A mayor reducción del flujo inicial, mayor es el sanado que ha experimentado la muestra.

Para estudiar la variación del flujo de agua debida al *self-healing* en función de la temperatura, ensayaron muestras de una abertura de fisura de 0,05 mm a distintas temperaturas (20°, 50° y 80°), (ver Figura 14). Aquellas muestras ensayadas a 80° mostraron la mayor sanación, pasando por ellas un flujo normalizado 97% menor al inicial a las 75 horas, mientras que en las muestras ensayadas a 50° y 20° la reducción del flujo normalizado inicial era de un 90% y un 60% respectivamente.

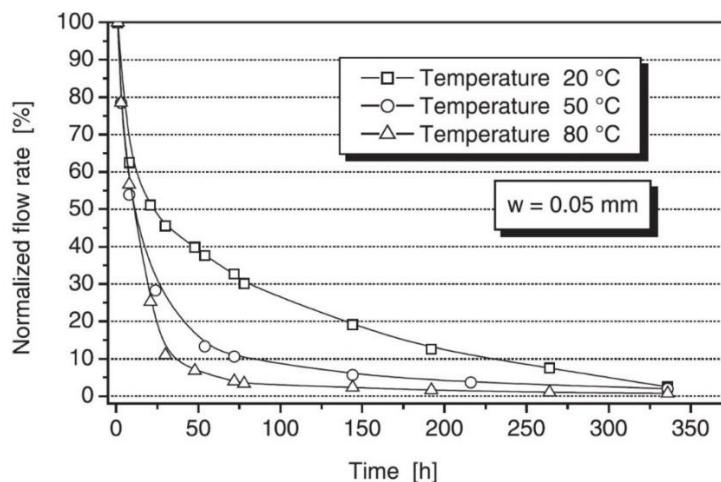


Figura 14. Reducción del flujo normalizado a causa del Self-Healing de la fisura para HPC en función de varias temperaturas, gradiente de presión de 1 MPa/m y abertura de fisura de 0,05 mm, [12].

Con estas investigaciones queda patente la relación entre la temperatura del agua y el proceso de sanado de las fisuras y además parece que cuanto mayor es la temperatura del agua mayor es el sanado que experimentan las fisuras.

Siguiendo en la línea de la relación entre temperatura, agua y sanado de las fisuras, varios autores han estudiado qué ambiente sería el óptimo para potenciar el sanado del hormigón después de someterlo a la fisuración [15], [16], [17].

Como se ha podido ver en este apartado, garantizar la presencia de agua en la fisura y sus alrededores es una cuestión clave para garantizar el *self-healing*, es por ello que muchos investigadores se han planteado cómo se podría asegurar la sanación de las fisuras aun no habiendo disponible agua exterior. Es decir, cómo almacenar agua que pueda ser utilizada por el hormigón en el caso de la aparición de fisuras.

Como respuesta a esta necesidad nace la idea de introducir polímeros súper absorbentes (SAP) o agua encapsulada en la matriz de hormigón dando lugar a hormigones diseñados para desarrollar una buena capacidad de sanación llamada sanación autónoma y que se explicará más adelante en el apartado 2.4.3.1.2.

2.3.2.3 Hidratación y cristalización.

Como se ha visto anteriormente, la hidratación y la carbonatación de productos sobre las paredes de la fisura son las principales causas del sanado de la misma. Varios investigadores han buscado cómo potenciar las reacciones de hidratación y carbonatación que experimenta el hormigón con la finalidad de potenciar el *self-healing*.

En el caso de la hidratación, se han sustituido porcentajes de cemento por otros materiales puzolánicos de reacción más lenta para garantizar la presencia de partículas que permanecen sin hidratar en la matriz y potenciar así la hidratación continuada y el cierre de fisuras al hidratarse estas partículas por el contacto con el agua que entra a través de las fisuras.

Varios investigadores, como Van Tittelboom et al. [13] Termkhajornkit et al. [18] y Sahmaran et al. [19], han seguido esta línea de reemplazar ciertos porcentajes del cemento de sus muestras por escorias de alto horno y/o cenizas volantes.

En el caso de Van Tittelboom et al. [13] los ensayos mostraron que la sustitución del cemento por estos materiales cementosos suplementarios resultaba en una mayor hidratación continuada, sin embargo, no mejoraba la precipitación de cristales de carbonato cálcico. Termkhajornkit et al. [18] observaron que las muestras con cenizas volantes presentaban un aumento en la cantidad de material hidratado después de 28 días frente a las que no llevaban esta adición (ver Figura 15).

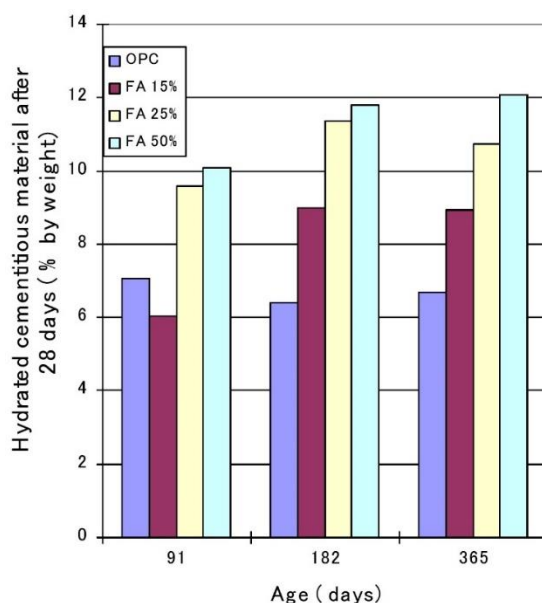


Figura 15. Cantidad de partículas cementosas que se hidratan después de 28 días, [18].

Sahmaran et al. [19] vieron en sus resultados una recuperación de la resistencia después de someter a compresión sus muestras con cenizas volantes, fisurarlas, almacenarlas en agua durante un mes y volverlas a cargar. Al comprimir y fisurar las muestras con cemento reemplazado por cenizas volantes observaron que éstas perdían un 27% de su resistencia, después del periodo de almacenamiento en agua, la pérdida de resistencia era de un 7%. En el caso de las muestras sin cenizas volantes, la pérdida inicial era de un 19% y la final después del periodo de almacenamiento en agua era de un 13%. En ensayos de permeabilidad, se obtuvieron observaciones similares y concluyeron con que como las muestras estudiadas contenían una gran cantidad de cenizas volantes sin hidratar estas observaciones se debían al *self-healing* de las fisuras preexistentes debido mayoritariamente a la hidratación de las partículas de las cenizas volantes que permanecían sin hidratar en las superficies de la fisura.

Respecto a la cristalización, otros investigadores han intentado aprovechar la formación de cristales con gran capacidad de expansividad para conseguir el sanado de la fisura gracias a su aumento de volumen o simplemente generar una gran cantidad de cristales que se depositen y sellen la fisura. Es el caso de los aditivos expansivos o cristalinos respectivamente y que se explicará con más detalle en el apartado 2.4.3.2.1.

2.3.3 Resumen sobre la sanación autógena

La sanación autógena del hormigón se desarrolla principalmente como consecuencia de los precipitados de carbonatos cálcicos y de la hidratación continuada de las partículas no hidratadas del clínker de cemento en las paredes de las fisuras. Muchos autores han tratado de mejorar la eficacia de este tipo de sanación, sin embargo hay varios parámetros que son susceptibles de limitarla, como son:

- El tamaño de abertura de fisura.
- La edad del elemento de hormigón o cementoso.
- La cantidad de partículas de cemento que han permanecido sin hidratar después del fraguado.
- El agua disponible en la fisura y su entorno.
- La temperatura del agua.
- El pH del agua.

En tanto que el proceso de self-healing autógeno se ha apreciado difícil de controlar e ineficiente, muchos investigadores han buscado qué materiales o agentes y cómo se podrían añadir al hormigón para hacer de la auto sanación del hormigón un proceso fiable y con resultados satisfactorios tanto en el sellado e impermeabilización como en la recuperación de las capacidades mecánicas

Es así como se concibe el concepto de auto sanación diseñada o autónoma del hormigón.

2.4 Sanación Autónoma (Autonomous Self-Healing)

2.4.1 Clasificación y métodos de sanación autónoma

Como se ha explicado anteriormente, la sanación autónoma del hormigón nace como respuesta al reto de conseguir un hormigón que selle y sane sus fisuras de forma autónoma, por lo que se ha investigado profundamente sobre qué materiales y en qué forma se pueden introducir en el hormigón para conseguirlo. Los procesos mediante los cuales se altera la capacidad intrínseca o autógena de sanación del hormigón se denominan generalmente métodos de sanación autónoma.

Los diferentes métodos de sanación autónoma consisten en dos agentes que son los que tomarán parte en el proceso de sanado y una forma de introducción de estos en el caso de que no estén ya presentes en la matriz del hormigón. Los agentes son el agente sanador y el catalizador.

El agente sanador será el agente causante de la sanación gracias a sus propiedades de producción de cristales, expansividad, etc. Los agentes sanadores comúnmente utilizados son el cemento, agentes químicos como las adiciones y las bacterias. El catalizador será el agente iniciador de este proceso que puede ser el agua, un segundo agente químico que reacciona con el agente químico que producirá la sanación o la introducción de nutrientes para bacterias en el caso en el que el agente sanador sean bacterias. El método de introducción de estos agentes en la matriz de hormigón puede ser mediante encapsulación, en cuyo caso se diferencia entre capsulas dispersas o capsulas fijas, o sin ningún tipo de encapsulación.

En este proyecto se describirán las diferentes metodologías para obtener la sanación autónoma en el hormigón siguiendo la clasificación de M. Roig [20] y que se corresponden con la Figura 16.

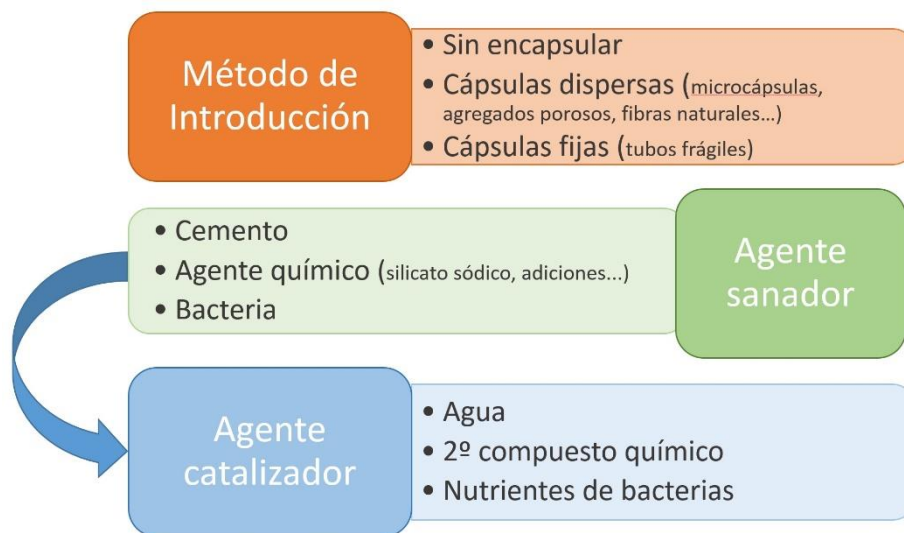


Figura 16. Agentes de la sanación autónoma: método de introducción, agente sanador y agente catalizador [Fuente: elaboración propia].

Generalmente, los métodos de sanación autónoma constan de las siguientes etapas: detección del daño, iniciación de la sanación mediante la activación del catalizador, transporte de los productos del proceso de sanación a la fisura y relleno y sanado de la fisura.

2.4.2 Métodos de introducción

Como se ha visto anteriormente en la Figura 16, los métodos de introducción tanto del agente sanador como del catalizador se pueden clasificar en: sin encapsulación, cápsulas dispersas y cápsulas fijas (o como otros autores llaman, sistemas vasculares [3]).

Los métodos de introducción sin encapsulación se basan en la adición del agente sanador en la matriz sin endurecer, normalmente durante la fabricación del hormigón o del mortero. En el caso de cápsulas dispersas, el agente sanador se introduce en cápsulas discretas que quedarán repartidas en la matriz, pueden ser generalmente cápsulas, agregados porosos o fibras naturales. Cuando se habla de cápsulas fijas o sistemas vasculares lo único que difiere con el método anterior es la posición de las cápsulas (que suelen ser tubos) ya que son sistemas grandes cuya localización en la matriz puede elegir el investigador.

En ambos casos, una vez la cápsula se haya roto mecánicamente como consecuencia de la fisuración o por otras causas, el agente sanador será liberado de la cápsula debido a las fuerzas de capilaridad [21]. Cuando el agente sanador entre en contacto con el catalizador se iniciará el sanado de la fisura.

Según la clasificación de Van Tittelboom y De Belie [3] y que se recoge en la Figura 17, el catalizador puede ser una condición propia de la matriz, como la humedad, el aire, el calor (A,B), o la misma matriz (C,D), o puede ser un segundo agente que o bien se haya añadido a la matriz sin encapsular (E,F) o bien encapsulado (G,H). Las formas de las microcápsulas continentales de los agentes sanador y/o catalizador puede ser esférica (A,C,E,G) o cilíndrica (B,D,F,H). En el caso de sistemas fijos, suelen ser tubos.

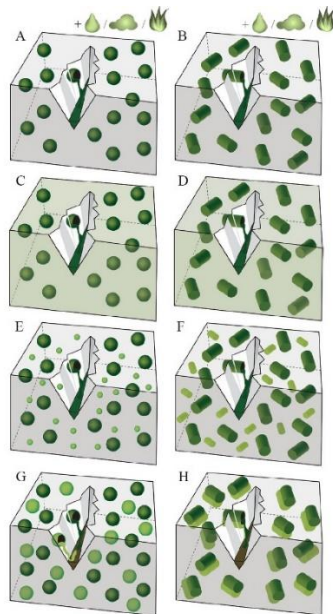


Figura 17. Tipos de introducción del agente sanador y agente catalizador, [3].

S. R. White et al. [21] en su investigación “Autonomic healing of polymer composites” definen el concepto de sanado autonómico/autónomo mediante encapsulación con la Figura 18, donde se muestran cápsulas con agente sanador embebidas en una matriz que contiene catalizadores.

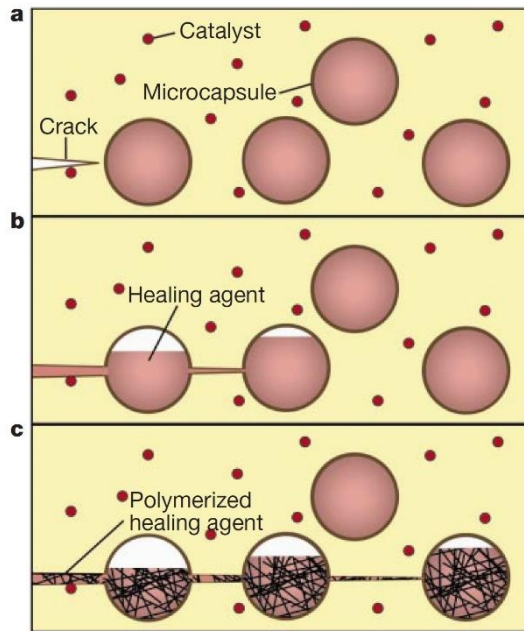


Figura 18. El concepto de sanación autónoma/autónoma, [21].

Las etapas del sanado son las siguientes:

- a) Formación de la fisura en la matriz.
- b) La fisura rompe las microcápsulas, vertiéndose el agente sanador en el plano de la fisura debido a la acción de la capilaridad.
- c) El agente de sanado contacta con el catalizador y tiene lugar la polimerización del agente sanador, llegando así a cerrar la fisura.

En Figura 19 (izquierda) y Figura 19 (derecha) se muestran imágenes reales tanto del proceso de ruptura y vertido del agente sanador anteriormente mencionado como de una cápsula rota.

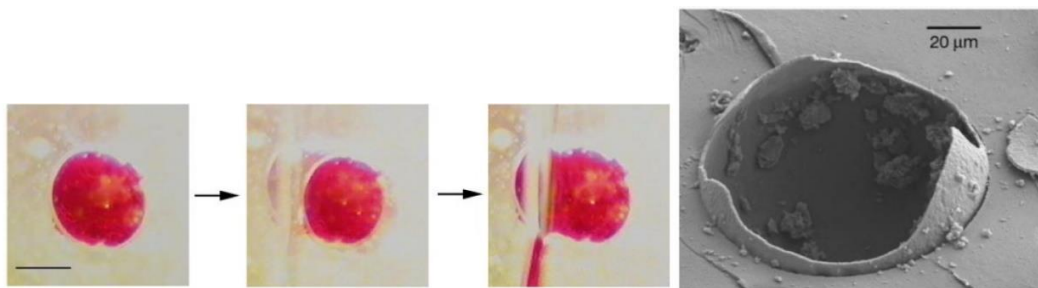


Figura 19. Fases de ruptura y vertido del agente sanador microencapsulado (izquierda). Imagen microscopía electrónica de barrido del plano de fractura de un material autosanable con microcápsula de ureaformaldeído (izquierda), [21]

Este mismo proceso es aplicable a las diferentes formas de encapsulamiento usadas: microcápsulas, agregados porosos y fibras tanto dispersas como fijas.

En este estudio White et al. analizan los efectos de la geometría y de las características mecánicas de las microcápsulas en su ruptura, así como las propiedades del agente sanador como la viscosidad, volatilidad, etc. que influirán en el vertido del mismo en las caras de la fisura. Según los autores, si las paredes de las cápsulas son demasiado gruesas no se romperán al aparecer la fisura en la matriz mientras que si son muy finas se romperán durante el procesamiento. Aseguran

que parámetros como la dureza y la rigidez relativa de las microcápsulas, así como la fuerza de la conexión entre la cápsula y la matriz son parámetros relevantes en el diseño de las cápsulas.

C. Dry [22] especifica en su estudio con cápsulas fijas que el material, la capacidad volumétrica, el tamaño, los poros y el tipo de vertido de las cápsulas tiene que estar relacionado con el volumen que se necesita liberar de agente sanador. Este volumen dependerá de la agresividad del ambiente, de la habilidad del agente para moverse en la matriz y la cantidad de volumen que quedará sin verterse.

M. Pelletier et al. [23] en su investigación con microcápsulas de poliuretano continentes de un núcleo de silicato sódico concluyen que las microcápsulas han probado ser una forma efectiva de guardar el agente sanador para una liberación controlada del mismo, siendo que en los ensayos a flexión los resultados obtenidos en las muestras con microcápsulas después de inducirles microfisuras son un 10% mejores que en las muestras de control. Además, los ensayos a compresión muestran que las cápsulas no interfieren con la matriz cementosa.

Así pues, el método de introducción mediante cápsulas dispersas o fijas se basa en la encapsulación del agente sanador y puede que del catalizador, de forma que cuando aparezca la fisura en la matriz del material cementoso las cápsulas se rompan y se libere el agente sanador por capilaridad, que mediante el contacto con el catalizador iniciará el proceso de sanado de la fisura. Dependiendo del agente de sanado utilizado (cemento, silicato sódico, bacterias...) se usará un catalizador u otro, pudiendo este ya estar en la matriz o añadirse mediante cápsulas.

Además del agente sanador y catalizador, son muchos los factores que influyen en la efectividad de la sanación mediante cápsulas, como la dureza de las cápsulas, las fuerzas entre las cápsulas y la matriz, la viscosidad del agente sanador, etc.

2.4.3 Agente sanador y catalizador

2.4.3.1 Cemento como agente sanador

Cuando el agente sanador es el cemento los mecanismos de sanación que se desarrollan en el hormigón son la hidratación continuada y la carbonatación, como se ha explicado anteriormente en el apartado 3.1.1. En esta forma de sanación el catalizador de la reacción es el agua, que al reaccionar con las partículas de cemento que no se han hidratado o con los Ca(OH)_2 dará lugar a productos que se depositarán en la fisura, llegando a sellarla.

2.4.3.1.1 Introducción del cemento

En este caso, la introducción en la matriz del agente sanador (cemento) se basa en la adición del mismo sin encapsular, como se realizaría en el caso de querer hacer un hormigón o un mortero.

Respecto al aporte de cemento encapsulado, no se conocen autores que hayan investigado la adición de capsulas continentes de cemento.

2.4.3.1.2 Introducción del catalizador

Para el cemento como agente sanador, el catalizador de la reacción de sanado es el agua. Como se ha visto en el capítulo 3.1.1.2, el agua es esencial para que se produzcan las deposiciones que sanan la fisura. Esta puede ser añadida a la matriz de la forma convencional, sin encapsular, o encapsulada.

Cuando se añade el agua sin encapsular se está hablando del agua que se aporta durante el amasado o que se aportará como ambiente de sanado (inmersión en agua).

En el caso de agua encapsulada, en las investigaciones desarrolladas hasta ahora se han abordado dos métodos principales de almacenamiento de agua. La línea de investigación principal para el aporte extra de agua son los polímeros súper absorbentes, aunque otros autores sugieren el estudio de otros elementos porosos para introducir reservas de agua como las fibras o cápsulas de nano arcilla [17], [24].

Los polímeros súper absorbentes (SAP) son materiales que tienen la habilidad de absorber y retener grandes cantidades de agua y soluciones acuosas.

Según M. Elliott en “*Superabsorbent Polymers*” [25] los primeros SAPs estaban hechos de almidón químicamente modificado y celulosa y otros polímeros como acetato de polivinilo (PVA) y polietilenglicol (PEO). Todos ellos son hidrófilos y tienen una alta afinidad por el agua. Cuando son ligeramente reticulados, química o físicamente, estos polímeros se convierten en absorbentes de grandes cantidades de agua sin llegar a disolverse. Los polímeros súper absorbentes actuales están hechos a partir de ácido poli(acrílico).

El incremento de los SAP es altamente dependiente del pH, contenido iónico y concentración de la solución, siendo que en agua desionizada pueden absorber aproximadamente 200 gramos de solución por gramo de polímero, mientras que añadidas al hormigón se reduce a 5-20 gramos de solución por gramo de polímero [26], (ver Figura 20).

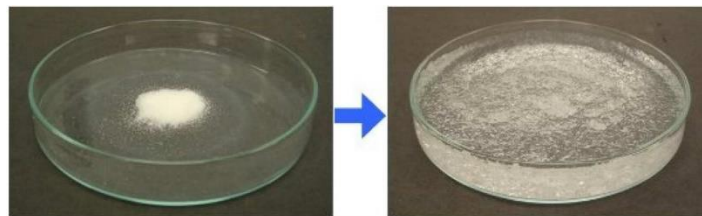


Figura 20. Proceso de aumento de volumen de las partículas SAP. Polvo seco de SAP en la imagen de la izquierda. Partículas SAP hidratadas formando un gel en la izquierda, [26].

El mecanismo en el que se basa el sanado de las fisuras mediante el aporte de polímeros súper absorbentes es el siguiente, definido por Lee et al [27]:

Los polímeros súper absorbentes se añaden al hormigón durante el amasado. En ese estado los SAPs aumentan su volumen solo ligeramente debido a que el agua de amasado alcanza un pH entre 12,5 y 13 y una alta concentración de iones. Conforme el cemento se hidrata, las partículas SAPs vierten el agua que han absorbido y se contraen, dejando atrás poros de tamaños similares a los poros capilares o microfisuras que son habituales en el hormigón (Figura 21 a), de forma que las fisuras formadas durante el servicio de la estructura se formarán a través de esos poros ya que suponen puntos de debilidad (Figura 1 b). Cuando el hormigón esté expuesto a condiciones externas húmedas, la penetración de la humedad a través de la fisura causará el aumento de

volumen de los SAP. Si el fluido externo posee una concentración baja de iones los SAP aumentarán más el volumen que cuando estaban expuestos al agua de amasado, expandiéndose más allá del poro y entrando en la fisura (Figura 21 c).

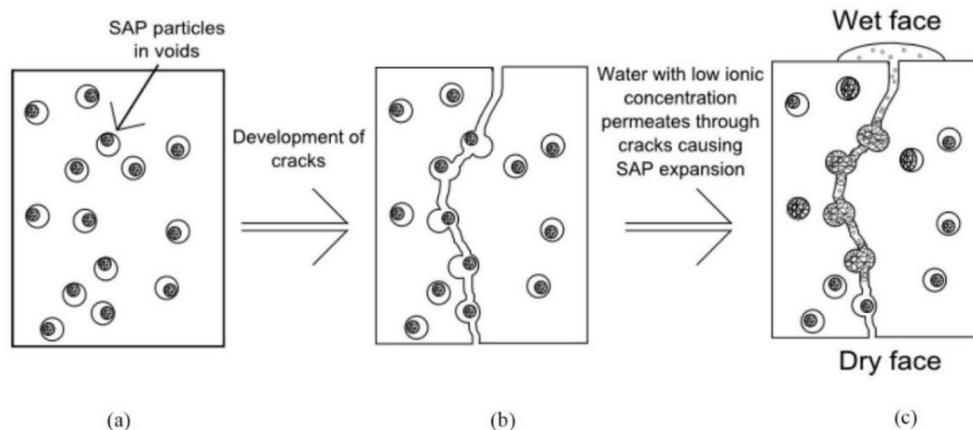


Figura 21. Esquema que muestra mecanismo de self-sealing de la fisura usando SAP, [27].

En tanto que la fisura está rellena de los polímeros hinchados se produce un sellado frente a otros líquidos de la fisura y por tanto una reducción de la permeabilidad.

Lee et al. [27] investigaron el efecto que causa el tipo de líquido al que se exponen los SAP sobre su aumento de volumen y por tanto su capacidad de almacenamiento de líquido. Observaron que se producía un sellado completo de la fisura cuando se utilizaba agua del grifo, agua de escorrentía subterránea simulada o una solución de cloruro de sodio mientras que al usar agua de mar la absorción de las partículas SAP quedaba limitada. Concluyeron por tanto que este enfoque de sanación es difícilmente aplicable a estructuras expuestas al agua de mar.

En este caso, el uso de partículas SAP estaría limitado ya no solo por la poca eficacia que presenta, sino porque supondría un ingreso de sulfatos y otros agentes agresivos presentes en el ambiente marino dentro del hormigón, que podría iniciar la corrosión de las armaduras y la degradación del hormigón.

Por tanto, la meta de introducir pues polímeros súper absorbentes en el hormigón está basada en la necesidad de aportar agua en el interior de la fisura que pueda hidratar las partículas de cemento no hidratadas durante el fraguado de forma que incluso en ambientes secos la fisura consiga sellarse. Sin embargo, para que los SAP se hidraten y se conviertan en almacenes de agua es necesario la existencia previa de líquido en el ambiente, como mínimo en forma de humedad ambiental.

Este tema fue objeto de investigación de D. Snoek et al. [28], analizando tanto el auto sellado de la fisura como su auto sanado en el caso de pequeñas fisuras al recuperar las propiedades mecánicas. El sellado de la fisura se analizó mediante tests de permeabilidad y la recuperación de propiedades mecánicas con ensayos a flexión a 4 puntos. Los productos de sanado que observaron fueron una combinación de productos debidos a la hidratación continuada de las partículas, la deposición de carbonatos y la activación de la reacción puzolánica de las cenizas volantes que contenía el cemento. Concluyeron con que las muestras que contenían Polímeros Súper Absorbentes mostraban un sanado parcial cuando se almacenaban en un ambiente con una humedad relativa mayor del 60%.

Otros autores han usado diferentes materiales para introducir en el hormigón almacenes de agua. Qian et al. [17] usaron cápsulas de nano arcilla para investigar la viabilidad de utilizarlas para potenciar el *self-healing*. Se usaron dos porcentajes de cápsulas de nano arcilla: Ma con un

contenido de 0,6% del peso total y Mb con un 1,2%. Además, usaron fibras de PVA en un contenido del 1,3% del peso total.

Se estudiaron las edades de prefisura de 14, 28 y 56 días y los siguientes ambientes de sanación post-fisuración durante 28 días (figura blablá): curado al aire (Humedad relativa del 30% a 20°, B), 3% de concentración de CO₂ (Humedad relativa del 50% a 20°,C) e inmersión en agua (E). A es el ambiente de control y D es una combinación de C y E originándose un ciclo de 2 días de curado en agua seguido de dos días de curado en seco en un 3% de concentración de CO₂ con la finalidad de simular los ciclos naturales de lluvia y secado. El programa de ensayo se muestra en la Figura 22.

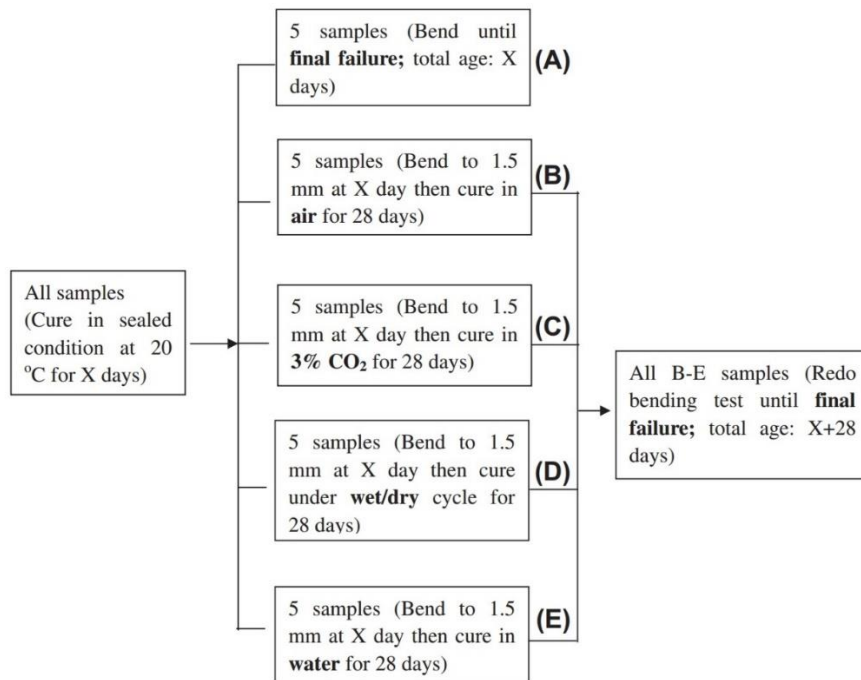


Figura 22. Programa de ensayo a flexión para compuestos cementosos autosanables. (X: edad de prefisura, variables de 14,28 y 56 días), [17].

Los resultados observados fueron los siguientes: la resistencia a flexión que desarrollan las muestras prefisuradas a edades más tempranas (14 y 28 días) y sanadas 28 días en aire, ambiente con dióxido de carbono, ciclos mojado-secado o en agua son mayores a las de referencia (condición A) (ver Figura 23). Esta tendencia se neutraliza cuando la edad de prefisura alcanza los 56 días. Los autores piensan que es debido a la hidratación de las partículas sin hidratar.

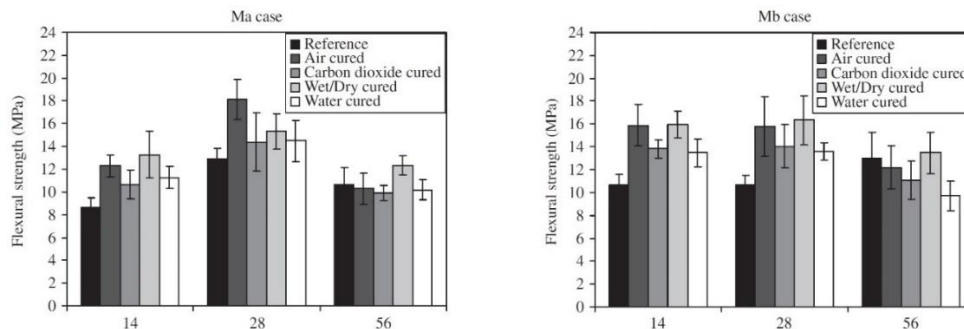


Figura 23. Comparación de la resistencia a flexión para diferentes ambientes de sanado y edad de prefisura para los casos Ma y Mb, [17].

2.4.3.2 Aditivo químico como agente sanador

Según el American Concrete Institute [29] los aditivos químicos son sustancias primarias solubles en agua que se han usado para mejorar las propiedades del hormigón o mortero en el estado plástico y endurecido, de forma que se tuviera un incremento en la resistencia a compresión y flexión, reducción de la permeabilidad, etc.

En el caso del uso de aditivos químicos como agente sanador la finalidad es la introducción de este compuesto químico en forma de aditivo para que potencie las reacciones que originan la deposición de productos de sanado en las fisuras. Sin embargo, una desventaja que presenta la introducción de partículas que pueden hidratarse o cristalizarse es que el proceso está limitado en cuanto el agente sanador se consume [3], otra sería el momento de activación.

En las líneas de investigación para mejorar el sanado de las fisuras mediante la utilización de aditivos químicos se utilizan principalmente dos tipos de aditivos: Aditivos Cristalinos (CA) y Aditivos Expansivos (EA).

2.4.3.2.1 Sin encapsulación

La introducción de los aditivos o bien cristalinos o bien expansivos en el hormigón se basa en el método de introducción que han tenido comúnmente los aditivos para el hormigón, los cuales se suelen añadir en el amasado.

2.4.3.2.1.1 Aditivos Cristalinos (CA)

Según ACI comité 212 [29] los Aditivos Cristalinos (CA) son un tipo de aditivo reductor de la permeabilidad (PRAs) que al reaccionar con el silicato tricálcico (C_3S) presente en el hormigón forman precipitados insolubles en agua que bloquean los poros y las fisuras y Silicatos Cálcicos Hidratados (C-S-H). Estos silicatos cálcicos formados a partir de los Aditivos Cristalinos tienen una mayor densidad. La reacción descrita sería la siguiente:



Donde M_xR_x es el agente cristalino, que reacciona con silicatos tricálcicos y agua para producir silicatos cálcicos hidratados modificados y un precipitado que bloquea los poros $M_xCaR_x - (H_2O)_x$ [20].

Zhengwu et al. [30] reemplazaron parte del cemento por tres aditivos cristalinos minerales diferentes: carbonatos, sulfoaluminato de calcio y metacaolín natural, potenciando cada uno de ellos un mecanismo concreto de sanación autógena.

En su estudio, el producto de sanado predominante fueron los carbonatos cálcicos, seguido de silicatos cálcicos hidratados, en contraposición con el ACI comité que asegura que el producto mayoritario se trata de silicatos cálcicos hidratados. Los ensayos mecánicos y de permeabilidad muestran una capacidad de sanación diferente para cada aditivo. Respecto a la permeabilidad, las reducciones mayores las muestra el metacaolín natural mientras que el uso de sulfoaluminatos de calcio no muestra ninguna mejora. Las muestras a las que se incorporaron carbonato muestran la

mejor recuperación de las propiedades mecánicas medidas en términos de módulos elásticos relativo y resistencia a la compresión (ver Figura 24).

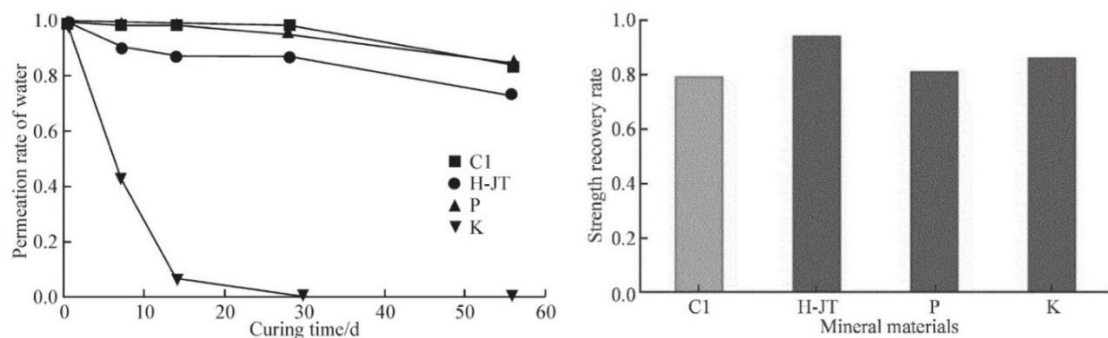


Figura 24. Evolución de la permeabilidad de las muestras (izquierda) y recuperación de la resistencia a compresión para diferentes aditivos minerales. (C1=control, H-JT=carbonatos, P=Sulfatoaluminato de calcio, K=metacaolin natural), [30].

Jaroenratanapirom y Sahamitmongkol [31] estudian en 2011 el efecto que tienen diferentes aditivos, entre los cuales se encuentra un aditivo cristalino, sobre la capacidad de sellado de la fisura mediante la observación y medida de la abertura de fisura. Para el rango de abertura de fisura de 0 a 0,05 mm los morteros con aditivo cristalino mostraron el mayor sellado de la fisura tanto a edades tempranas (3 días) como a 28 días.

La investigación de Sisomphon et al. [32] en 2012 afirma que la reacción del Aditivo Cristalino no se produce con los silicatos tricálcicos sino con la portlandita.

En 2014 Ferrara y Krelani [33] [15] estudian el uso de aditivos cristalinos en un hormigón de muy alto rendimiento. Para ello, añadieron un aditivo cristalino basado en la mezcla de sílice con cemento, arena y otros activos químicos en una cantidad del 1% respecto al peso de cemento. Concluyeron con que la eficiencia de la sanción en el hormigón aumenta con el uso de este aditivo cristalino, sobretodo en el caso de abertura de fisura de 270 μm y expuesta a ciclos de humedad como se puede observar en la

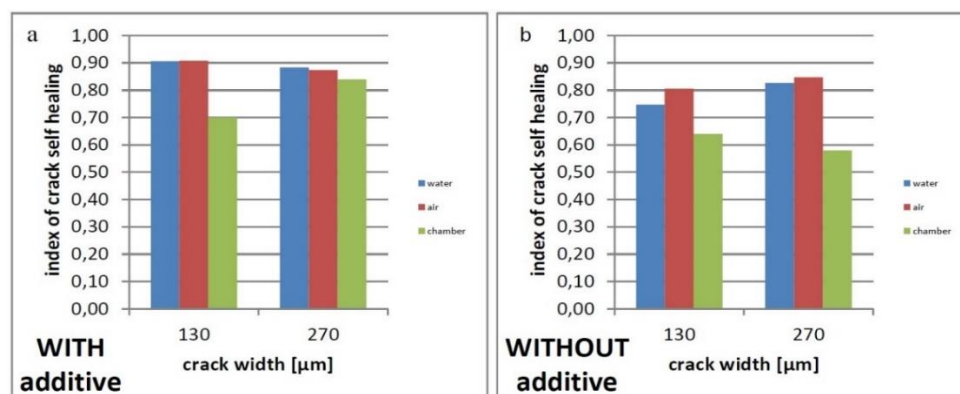


Figura 25. Índice de sanado de la fisura evaluado para hormigones sin (a) y con (b) aditivo cristalino, en función de la abertura de fisura y la duración de la exposición, [15].

Roig-Flores et al. [16] obtuvieron diferentes resultados al estudiar el self-healing de hormigones con aditivo cristalino mediante ensayos de permeabilidad de muestras prefisuradas y expuestas a diferentes ambientes de sanado, donde concluyen que los ciclos de mojado/secado son más

desfavorables que la inmersión en agua para el sanado de las fisuras con aditivo cristalino. Los resultados obtenidos mediante los ensayos de permeabilidad fueron los siguientes, también expuestos en la Figura 26:

		Concrete class	Control concrete		Concrete with Crystalline Admixtures	
			Before healing	After 42 days healing	Before healing	After 42 days healing
Exposure	Water Immersion at 15°C	Precast				
		Standard				
	Water Immersion at 30°C	Precast				
		Precast				
Wet/dry cycles	Precast					

Figura 26. Fisura antes y después del sanado para probetas de control y con Aditivos Cristalinos, para las dos cualidades de hormigón y expuesto a los tres ambientes: inmersión en agua a 15 °C, inmersión en agua a 30°C y ciclos mojado/secado, [16].

2.4.3.2.1.2 Aditivos Expansivos (EA)

Este tipo de aditivos suelen estar compuestos por sulfoaluminatos cálcicos y contienen hidróxido cálcico Ca(OH)_2 y CaSO_4 sin hidratar.

En 2010 Ahn y Kishi [34] propusieron un agente sanador que abarcara todos los mecanismos de sanación principales: agentes químicos entre los cuales estaban varios carbonatos para la precipitación de cristales, geopolímeros (silica y alumina) para la absorción de agua y aditivos expansivos como hauyne ($\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$), anhidrita (CaSO_4) y cal libre (CaO) para la sanción por la expansión de cristales (ver Figura 27).

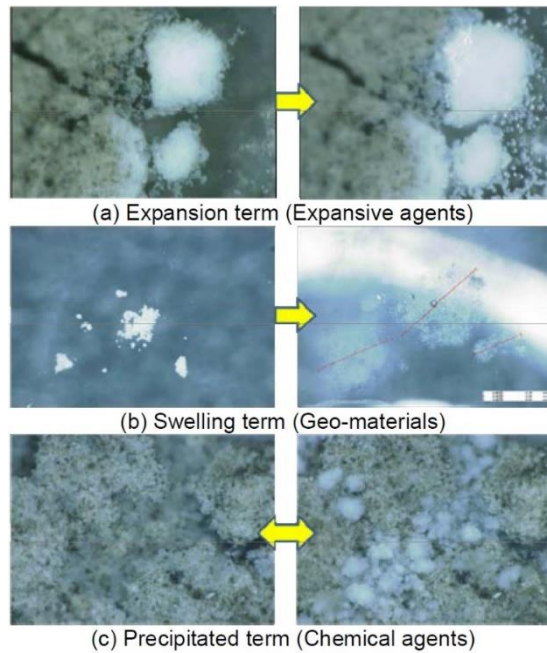


Figura 27. Diseño del material cementoso con capacidad para el auto sanado, [34].

Concluyeron que el sanado de la fisura se puede obtener reemplazando un 10% del cemento mediante una adecuada combinación de los agentes químicos, los geopolímeros y los aditivos expansivos, generando productos de sanado formados mayoritariamente por fases C-A-H y calcita (Figura 28).

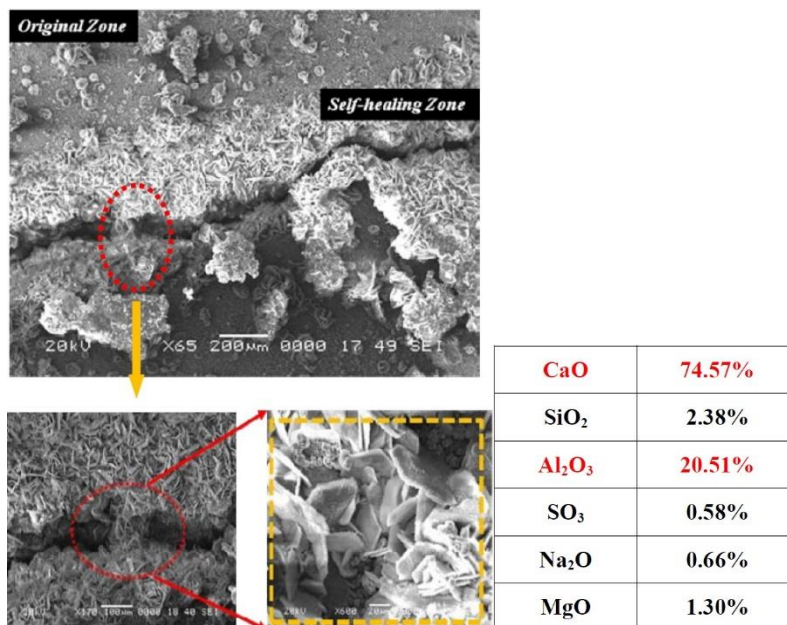


Figura 28. C-A-H y carbonato cálcico como productos de sanado en la fisura (izquierda), composición química (derecha), [34].

En la investigación de 2011 de Jaroenratanapirom y Sahamitmongkol los aditivos expansivos fueron estudiados al igual que los aditivos cristalinos. [31] El contenido en aditivo expansivo fue de un 10% del peso de cemento. Para aberturas de fisuras pequeñas (0-0,05 mm) los morteros con

aditivo expansivo necesitaron más tiempo que los morteros con aditivo cristalino para cerrar su fisura. Sin embargo, esta tendencia se invierte para aberturas fisuras mayores producidas a 3 días (0,1-0,2 mm) donde las muestras con aditivo expansivo muestran una potencia mucho mayor, habiéndose sanado estas últimas a los 19 días mientras que las muestras con aditivo cristalino necesitaron 44, como se muestra en la Figura 29.

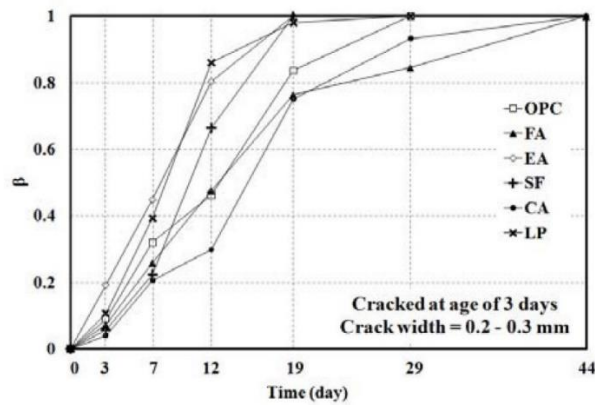


Figura 29. Impermeabilización de las muestras en función del tiempo para diferentes aditivos. Edad de fisura de 3 días, abertura de fisura entre 0,2 y 0,3 mm, [31].

Para mayores edades de aparición de la fisura, los resultados con aditivos expansivos no mantienen efectividad que muestran cuando la fisura aparece a los 3 días.

2.4.3.2.2 Encapsulación dispersa

Pelletier et al. [23] encapsularon una disolución de silicato sódico (Na_2SiO_3) en cápsulas esféricas. Cuando las cápsulas se rompían por la aparición de una fisura, la solución se vertía sobre la matriz del hormigón y reaccionaba con el hidróxido cálcico $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente de forma natural en el hormigón formando Silicato cálcico hidratado CSH, producto que sella la fisura.

Haoliang Huang y Guang Ye [35] llegaron a las mismas conclusiones en su investigación. Afirman también que los productos de sanado formados en las fisuras son los compuestos formados por CSH y silicato sódico. Por tanto, el mecanismo principal de autosanado que se genera al usar una solución de silicato sódico es la reacción de los cationes de calcio con el silicato sódico disuelto, dando lugar a la cristalización del silicato sódico. Observaron también una mejora significativa de las propiedades mecánicas, siendo que la eficiencia de la recuperación aumentaba al aumentar la concentración de la solución de silicato sódico.

2.4.3.2.3 Encapsulación localizada

Carolyn Dry empezó usando la encapsulación localizada a principios de los años 90. En sus primeras investigaciones [22] estudió la reparación o sanación de las fisuras en matrices cementosas debido al vertido interno de químicos reparadores desde el interior de unas fibras (tubos) colocadas en la matriz endurecida. Recubrió estas fibras fijas de polipropileno con metil metacrilato líquido para que se almacenara en sus poros, de forma que al aplicar calor a la matriz el recubrimiento de cera de las fibras se fundiera y el metil metacrilato se vertiera desde las fibras

a las fisuras. Si se aumenta el calor, el metil metacrilato se polimeriza, (Figura 30). Como resultados, obtuvo el relleno de las fisuras y una reducción de la permeabilidad.

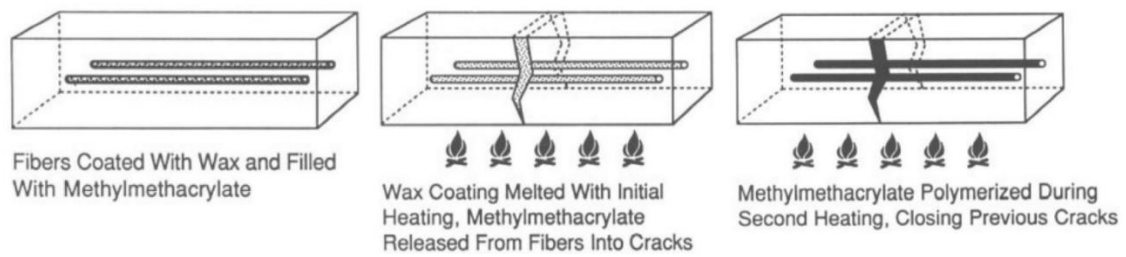


Figura 30. Diseño para un vertido temporalizado de químicos polimerizables para reparar fisuras y rellenar poros mediante el fundido del revestimiento en los poros de las fibras, [22]. Modificando.

Posteriormente a este artículo Dry realizó una aplicación de su estudio en el tablero de un puente a escala real que expuso en el SIE Symposium on Smart Structures and Materials en 1999 [36], ya que la microfisuración del tablero es un factor crítico en su diseño y que en 2000 publicó.

En este estudio, para controlar y reparar las fisuras por retracción antes de 28 días diseñó el tablero con tubos frágiles llenos de sellante de forma que se rompieran al producirse las fisuras de retracción en el hormigón. Igualmente, se dispusieron cápsulas tubulares continentas de adhesivos más fuertes y con módulos más altos bajo la superficie en áreas en las que la tensión causada por la flexión a la que se le sometería pasados los 28 días fuera alta, por ejemplo en la parte de arriba de la sección de los apoyos (Figura 31).

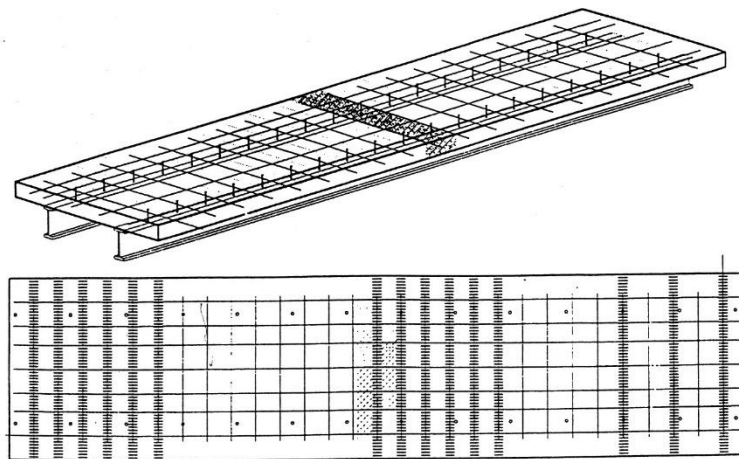


Figura 31. Dibujo de la superficie de los tableros de dimensiones 4 x 20 ft en los que se embebieron los tubos, [36].

Los resultados confirmaron la eficacia de este método para sanar las fisuras de forma autónoma.

En 2001 [37] comparó el uso de cianoacrilato, cianoacrilato y epoxy y otro basado en silicona como agentes sanadores en estructuras de pórticos sometidas a ciclos de carga. Los tres agentes endurecen mediante el contacto con el aire. Su eficiencia de sanado fue medida en función del número medio de fisuras nuevas abiertas en la segunda carga a flexión. Según Dry, la aparición de fisuras nuevas significa el sanado de las fisuras anteriores debido a la ganancia de resistencia que el sanado de las fisuras provoca y la redistribución de las tensiones a la sección no fisurada, donde las nuevas fisuras se forman. Mientras que las muestras con silicona y epoxy abrían sus

primeras fisuras, las que contenían los tubos con cianoacrilato permanecían cerradas mientras se formaban segundas fisuras, confirmando la sanación de las primeras.

En 2011 Van Tittelboom et al. [38] compararon la efectividad de la sanación en función del material de tubo, obteniendo mejores resultados en tubos de cerámica que en tubos de cristal.

Sun et al. [39] introdujeron etil-cianoacrilato en fibras huecas. A pesar de que estudiaron la capacidad de sanación para diferentes aberturas de fisura solo observaron una recuperación de la resistencia del 20%.

2.4.3.3 Bacteria como agente sanador

Las bacterias como agente sanador en el hormigón son probablemente el enfoque de sanación autónoma más novedoso y que más curiosidad ha causado en la sociedad, llamándose a este hormigón biohormigón u hormigón con bacterias.

El mecanismo fundamental en el que está basada la sanación mediante bacterias es la deposición de carbonatos en la fisura. Sin embargo, no todos los tipos de bacterias se pueden introducir en el hormigón para sanar sus fisuras. Debido al ambiente alcalino en el interior del hormigón las bacterias que se introduzcan deben ser capaces de sobrevivir estando expuestas a un pH que normalmente está alrededor de 12,5 y deben ser capaces de producir deposiciones de carbonatos para sellar las fisuras.

Algunas de las especies de bacterias que cumplen con estas condiciones son *Bacillus cohnii*, *Bacillus pasteurii*, *Bacillus lentus*, *Bacillus sphaericus* (Figura 32) y *Pseudomonas aeruginosa*. [40]

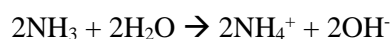
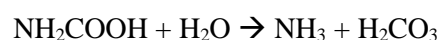
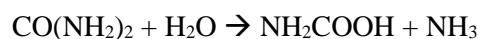


Figura 32. Bacteria *Bacillus sphaericus* utilizada para la sanación del hormigón con bacterias. [40]

Las bacterias aptas para producir el autosanado autónomo del hormigón se pueden clasificar en dos tipos según el tipo de metabolismo de la bacteria: basadas en urea y no basadas en urea.

2.4.3.3.1 Basadas en urea

Según Siddique y Chahal [41] este tipo de bacterias basan su producción de carbonatos en la hidrólisis de la urea en un ambiente rico en calcio. La reacción sigue la siguiente ecuación [42]:





Según los autores, en este proceso las paredes celulares de las bacterias se cargan negativamente, de forma que atraen a los cationes calcio. Estos reaccionarán con los iones carbonato (CO_3^{2-}) para formar carbonato cálcico.

En esta reacción de producción de carbonatos, otro producto que se genera es el amoníaco (NH_3) en grandes cantidades, acidificando el hormigón y aumentando el riesgo de corrosión de los refuerzos de acero. [43]

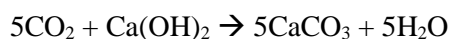
Esta es la causa de que varios autores como Jonkers [44] decidieran buscar bacterias que produzcan diferentes reacciones para precipitar los carbonatos: las bacterias no basadas en urea.

2.4.3.3.2 No basadas en urea

En 2010 Jonkers et al. investigaron el uso de una bacteria alcalino-resistente en forma de espora como productora de minerales en el hormigón [44]. Las esporas fueron añadidas al hormigón en el amasado. Los minerales producidos son carbonatos cálcicos debido a la conversión metabólica que realiza la bacteria del lactato de calcio que se introduce como nutriente. La reacción sigue la siguiente ecuación:



Además, la bacteria produce moléculas de CO_2 que reaccionarán con la portlandita presente en el hormigón como producto de su hidratación ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) siguiendo la siguiente reacción:



A pesar de las mejoras, la viabilidad de este método parece estar conectada con el continuo decrecimiento de los diámetros de los poros de la matriz del hormigón. Cuando los poros se hacen más pequeños que el tamaño de las esporas de las bacterias estas mueren, rompiendo el ciclo de sanado. En el mismo artículo plantean como solución la introducción de las bacterias en cápsulas o una matriz protectora.

2.4.3.3.3 Encapsulación de bacterias

La encapsulación de bacterias se ha estudiado de diversas formas. Varios autores han estudiado en qué materiales las bacterias eran capaces de precipitar mayores cantidades de carbonatos, como Wang et al [45].

En 2011 Jonkers estudió la introducción de bacterias en forma de una solución con nutrientes en agregados porosos con la finalidad de proteger a la bacteria del decrecimiento de los poros de la matriz de hormigón [46]. Después de 6 meses las bacterias seguían vivas.

El uso de bacterias como agente sanador es una línea de investigación reciente y que sigue en desarrollo, pero que puede ser muy prometedora en tanto que se alargue la expectativa de vida de las bacterias al periodo de vida útil de una estructura.

2.4.4 Resumen sobre la sanación autógena.

Durante este capítulo (2.4) se han tratado varios conceptos importantes sobre la sanación autónoma que se resumen aquí:

- Hay una gran variedad de métodos para la obtención del autosanado del hormigón de forma autónoma.
- Estos métodos normalmente necesitan la acción de un agente sanador y de un catalizador, que pueden estar presentes naturalmente en el hormigón o necesitar ser introducidos en la matriz.
- Esta introducción se puede realizar tanto sin encapsulación como de forma encapsulada.
- Las técnicas de encapsulación pueden determinar la viabilidad de un método.
- Los Aditivos Cristalinos y los Aditivos Expansivos son los únicos métodos de sanación autónoma que se han comercializado hasta la actualidad.
- La introducción de adhesivos como agente sanador ha dado buenos resultados.
- La encapsulación en agua mediante SAP puede ser prometedora como agente de sanado en tanto que el ciclo continúe solo con estar expuestos los SAP a la humedad ambiente.
- La sanación con bacterias o biohormigón es una metodología reciente pero que puede ser prometedora debido a la posibilidad de encapsular las bacterias.

Por tanto y como conclusión a este apartado, a pesar de que la autosanación del hormigón es un tema relativamente joven y queda mucho por investigar sobre cómo mejorarla y aplicarla en obra, la recuperación de propiedades mecánicas del hormigón mediante adiciones o sistemas diseñados, estando éste expuesto únicamente a la humedad ambiente implicaría la obtención de un material inteligente, con un sanado eficaz y prácticamente independiente de las condiciones ambientales exteriores.

2.5 Métodos de evaluación de la recuperación de las capacidades mecánicas

En este apartado se explicarán los métodos que han seguido varios autores para evaluar la recuperación de las propiedades mecánicas en hormigones autosanables reforzados con fibras ya que este trabajo se enfoca en la evaluación de esta recuperación.

2.5.1 Conceptos previos sobre hormigón reforzado con fibras

El hormigón es un material compuesto que debido a las propiedades de sus componentes tiene baja resistencia a tracción (alrededor de un 10% de la resistencia a los esfuerzos de compresión). Esto implica que si en una sección determinada es el único material que está resistiendo tensiones, en el momento que estas sean tracciones aparecerán fisuras en esa sección. La aparición de las fisuras implica para el hormigón la reducción de la sección resistente, incrementando las tensiones en las zonas no fisuradas, de forma que cada vez las fisuras se propagan más y se llega al colapso de la sección en un tiempo relativamente pequeño si no cesa la carga.

La introducción de fibras en el hormigón proporciona un mejor comportamiento de la estructura ya que incrementa la resistencia postfisuración al añadir a la matriz (y a la sección resistente) un material que sí que resiste las tracciones.

Como se observa en la figura Figura 33 las matrices no reforzadas colapsan al llegar a un punto en el que el hormigón pierde su sección resistente, mientras que en los hormigones reforzados hay una transmisión de esfuerzos del hormigón a las fibras, de forma que la sección puede seguir resistiendo los esfuerzos mientras que poco a poco a la fisura se va abriendo. Esto es debido a la resistencia residual que aportan las fibras.

Cuanto más fibras atraviesen la fisura el comportamiento puede ser de endurecimiento a flexión (curva superior de la Figura 33) o de ablandamiento a flexión (curva inferior de la Figura 33).

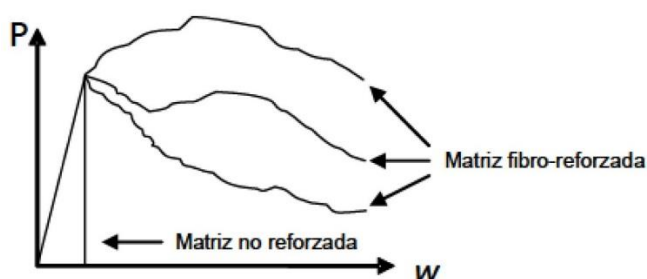


Figura 33. Curvas típicas de carga-abertura de fisura para matrices con y sin fibras, [47].

La naturaleza de las fibras, el tipo y la cantidad de fibras que atraviesen la sección resistente determinarán la eficacia del refuerzo.

En la actualidad hay muchos tipos de fibras, desde las naturales, las recicladas, de polipropileno, de vidrio o, las que son objeto de este proyecto, las fibras de acero.

Las secciones de fibras comerciales de acero más comunes son las mostradas en la Figura 34. El tipo de sección de la fibra influirá en su contribución a la resistencia de los esfuerzos y en su forma de fallo.

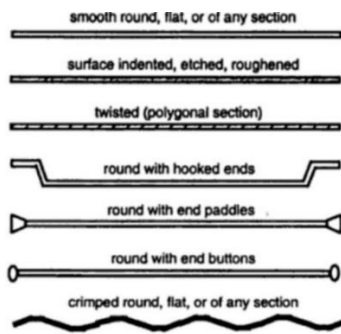


Figura 34. Tipos de secciones de fibras, [48].

Según el anejo 14 de la EHE: “Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras” las fibras pueden ser estructurales o no estructurales, en función de si proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa.

La UNE 83500-1 y UNE 83500-2 definen los siguientes parámetros para la descripción geométrica de las fibras:

- Longitud de la fibra (mm): l_f
- Diámetro o diámetro equivalente de la fibra (mm): d
- Esbeltez o relación de aspecto de la fibra: l/d

El fallo de las fibras se puede dar debido a un exceso de tracciones en la fibra o rotura frágil o por la pérdida de adherencia o rotura dúctil.

Según la cantidad de fibras a añadir al hormigón se obtendrán diferentes comportamientos a flexión como son el ablandamiento a flexión (Figura 35) y el endurecimiento a flexión (Figura 35).

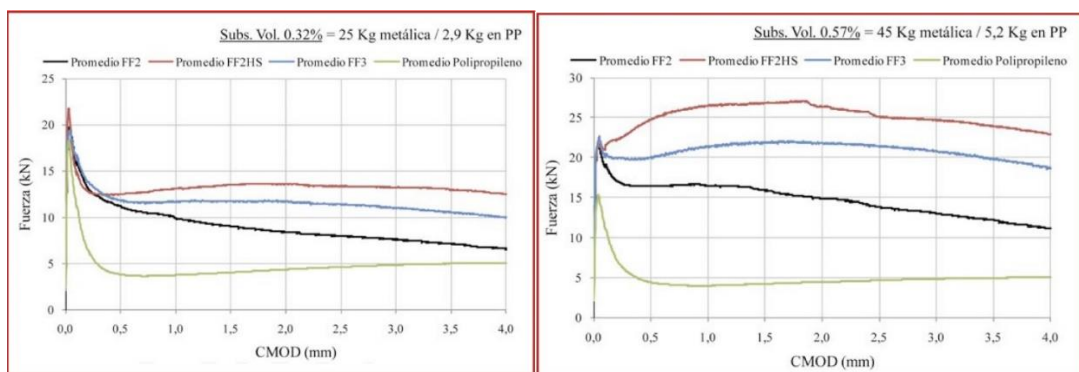


Figura 35. Ablandamiento a flexión (derecha, línea roja) y endurecimiento a flexión (izquierda, línea roja), [49].

2.5.2 Método según borrador del CEN/TC 104 N 1404

Según el borrador propuesto por el comité de normalización europeo (European Committee for Standardization, CEN) para calcular la recuperación de las propiedades mecánicas se necesitan dos series de probetas (A y B).

Las probetas A se ensayan a flexión de forma que se carguen, se fisuren y a una determinada abertura de fisura se proceda a la descarga (Cycle A1 en la Figura 36). Las probetas B no se ensayan en este momento.

Una vez fisuradas las probetas A, se introducen en el ambiente de sanado junto con las probetas B. De esta forma, las probetas A y B se introducen en el ambiente de sanado al mismo tiempo.

Una vez finalizado el periodo de sanación, se sacarán al mismo tiempo las probetas A y las B. Las probetas A son re-cargadas (Cycle A2 en la Figura 36) hasta que lleguen de nuevo a una abertura de fisura determinada. Luego se descargan.

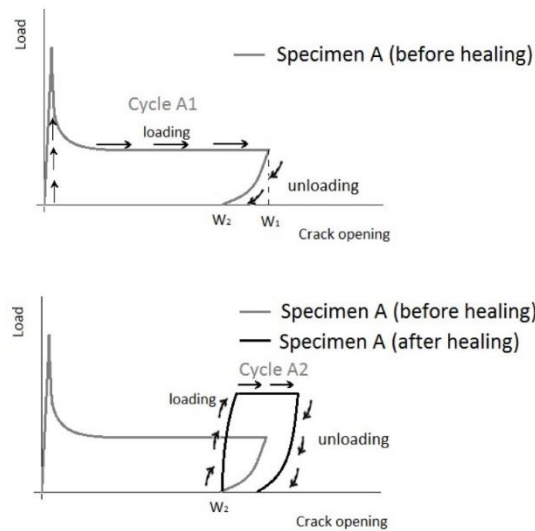


Figura 36. Ciclos Carga- Descarga Probetas A. Cycles A1 corresponden a los ciclos del primer ensayo a flexión para probetas A sin fisurar. Cycles A2 son los ciclos de las probetas fisuradas y sanadas, [33].

Las probetas B son ensayadas en este momento por primera vez. Se les aplica carga a la misma velocidad que a las probetas A. Una vez que haya fisurado la probeta B y que haya llegado a la abertura de fisura a la que se llegó con la probeta A se procede a la descarga, cerrando el primer ciclo (Cycle B1). Posteriormente se procede a la re-carga de la probeta B, dando lugar al ciclo Cycle B2 (ver Figura 37).

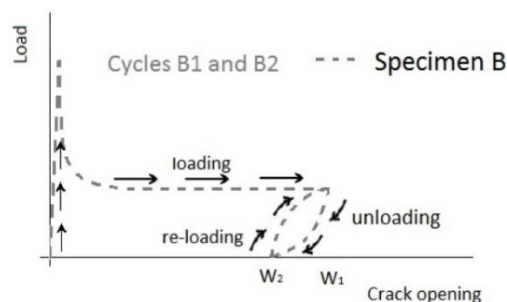


Figura 37. Ciclos Carga-Descarga Probetas B. Cycles B1 corresponden a los ciclos del primer ensayo a flexión para probetas B sin fisurar. Cycles B2 son los ciclos de las probetas fisuradas sin sanar, [33].

A continuación se muestra esquema representativo de los procesos más importantes en esta metodología (ver Figura 38):

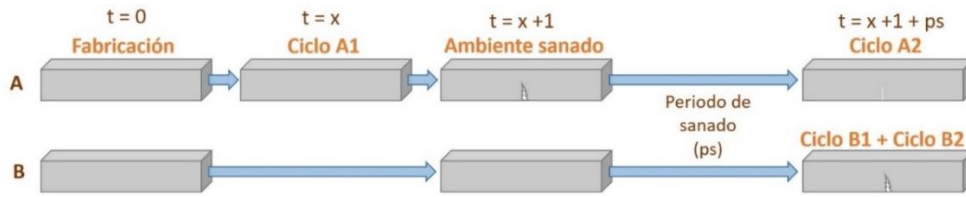


Figura 38. Etapas de la metodología propuesta. [Fuente: elaboración propia].

Los apartados 2.5.2.1 y 2.5.2.2 explican cómo se plantea esta metodología de cálculo de la recuperación de propiedades mecánicas.

2.5.2.1 Recuperación de la resistencia a flexión

La recuperación de la resistencia a flexión de la serie A se calcula en base a los ciclos carga-descarga que ha tenido esa serie A y la serie B. Los valores de carga necesarios para el cálculo se definen en la siguiente imagen:

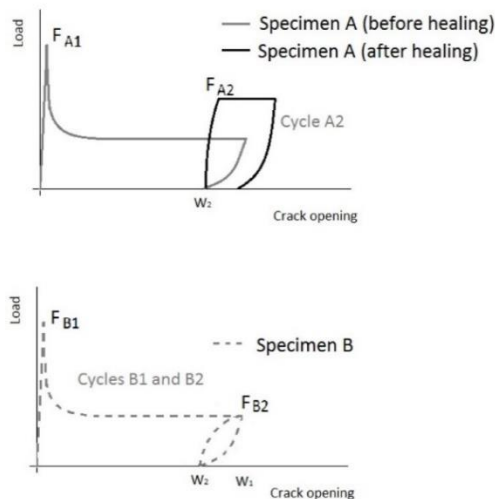


Figura 39. Valores de carga obtenidos en los ensayos a flexión de los ciclos A2, B1 y B2, usados para el cálculo de la recuperación de la resistencia, [33].

La recuperación de la carga máxima a flexión o resistencia a flexión se expresa de la siguiente forma:

$$R_{Strength} = \frac{\bar{F}_{A2} - \bar{F}_{B2}}{\bar{F}_{B1} - \bar{F}_{B2}} \times 100\%$$

Donde:

- $R_{Strength}$: Recuperación de la resistencia
- F_{A2} : Promedio de los valores de carga pico obtenidos durante la carga de las probetas A, después de la exposición al periodo de sanado (cycle A2)
- F_{B1} : Promedio de los valores de carga pico obtenidos durante la primera carga de las probetas B (cycle B1).

- F_{B2} : Promedio de los valores de carga obtenidos para la abertura de fisura W_1 , durante la recarga de las probetas B (cycle B2).

El significado físico de esta ecuación se basa en la diferencia entre la tensión a la que llega la probeta prefisurada sanada (A) y la probeta fisurada pero no sanada porque se ha fisurado posteriormente a la exposición al periodo de sanado (B). Es importante puntualizar que ambas probetas A y B tienen la misma edad, sino se podría evaluar erróneamente como recuperación de resistencia el aumento de resistencia que tienen las probetas con la edad.

Si no hubiera sanación estas tensiones F_{A2} y F_{B2} tendrían que ser aproximadamente iguales ya que se han fabricado con el mismo hormigón y tienen la misma edad. En este caso $R_{Strength} = 0$.

Si la fisura experimenta una sanación que repercute en sus capacidades mecánicas $F_{A2} > F_{B2}$ por lo que el numerador de la ecuación debería ser un número positivo diferente de 0 y se expresaría la recuperación de la resistencia en función de la pérdida que ha experimentado la probeta B al fisurarse ($F_{B1} - F_{B2}$).

2.5.2.2 Recuperación de la rigidez a flexión

La recuperación de la rigidez a flexión para la serie A se calcula en base a las pendientes de los ciclos carga-descarga de las probetas A y B.

Para calcular las pendientes necesarias, se tomará el 40% del pico de carga y se calculará la pendiente con los valores comprendidos entre el 0 y el 40% de la carga pico (ver Figura 40).

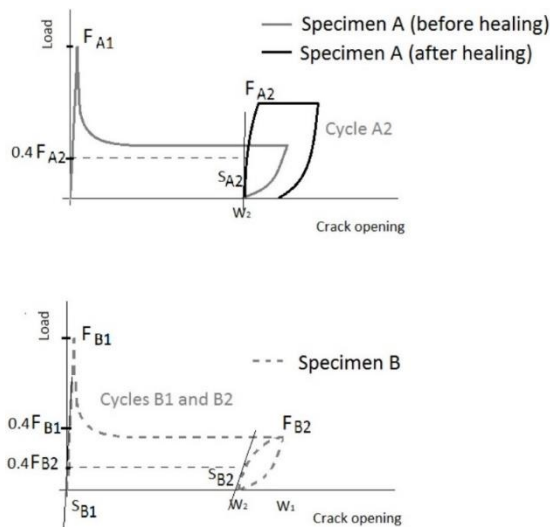


Figura 40. Pendientes para el cálculo de la recuperación de la rigidez tanto para A como para B, [33].

La recuperación de la rigidez será calculada como indica la ecuación:

$$R_{Stiffness} = \frac{\bar{S}_{A2} - \bar{S}_{B2}}{\bar{S}_{B1} - \bar{S}_{B2}} \times 100\%$$

Donde:

- $R_{\text{Stiffness}}$: La recuperación de la rigidez
- S_{A2} : Promedio de los valores de rigidez obtenidos durante la carga de las probetas A, después del periodo de sanado (Cycle A2)
- S_{B1} : Promedio de los valores de rigidez obtenidos durante la primera carga de las probetas B (Cycle B1)
- S_{B2} : Promedio de los valores de rigidez obtenidos durante la recarga de las probetas B (Cycle B2)

De igual manera que para la recuperación de la resistencia a flexión, el significado físico de esta ecuación se basa en la diferencia entre la pendiente (rigidez) de la probeta prefisurada sanada (A) y la de la probeta fisurada pero no sanada porque se ha fisurado posteriormente a la exposición al periodo de sanado (B). Es importante puntualizar que ambas probetas A y B tienen la misma edad, sino se podría evaluar erróneamente como recuperación de rigidez el aumento de rigidez que tienen las probetas con la edad.

Si no hubiera sanación estas rigideces S_{A2} y S_{B2} tendrían que ser aproximadamente iguales ya que se han fabricado con el mismo hormigón y tienen la misma edad. En este caso $R_{\text{Strength}} = 0$.

Si la fisura experimenta una sanación que repercute en sus capacidades mecánicas $S_{A2} > S_{B2}$ por lo que el numerador de la ecuación hablaría sería un número positivo diferente de 0 y se expresaría la recuperación de la rigidez en función de la pérdida que ha experimentado la probeta B al fisurarse ($S_{B1} - S_{B2}$).

2.5.3 Metodología según investigaciones de Liberato Ferrara

La siguiente metodología es la llevada a cabo por Liberato Ferrara, Visar Krelani y Maddalena Carsana en su publicación "A "fractures testing" based approach to assess crack healing concrete with and without crystalline admixtures" [7].

En esta investigación se propone un método para evaluar la sanación a causa del uso de aditivos cristalinos, por lo que se usarán probetas control y probetas con aditivo.

Para evaluar tanto la recuperación de la carga pico como de la rigidez, se ensayan las probetas a flexión. Este primer ciclo sería el expuesto en la imagen hablaría en azul, en el que la probeta se carga, se fisura al llegar al punto f_{cf} y se descarga para un determinado COD, obteniendo al final de la descarga una tensión que los autores marcan como $\sigma_{\text{unloading,pre-crack}}$.

Estas probetas posteriormente se exponen a los ambientes de sanado designados y cuando finaliza el periodo de exposición se extraen y se recargan, obteniendo los puntos $\sigma_{\text{max,reloading,post-condition}}$ (ver Figura 41).

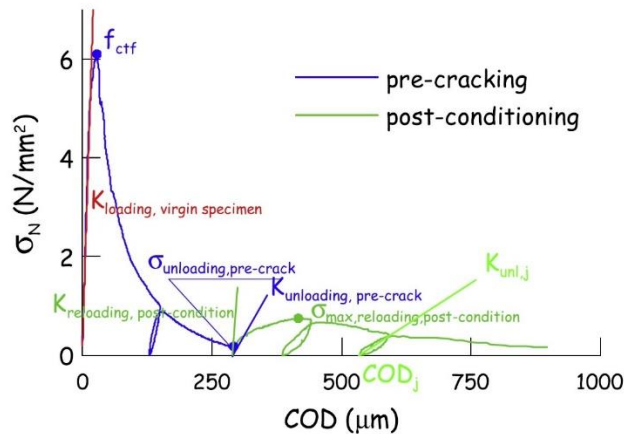


Figura 41. Ejemplo curva tensión-COD para probetas prefisuradas y post-sanado sometidas a ensayo de flexión a 3 puntos. Definición de parámetros para los cálculos de los índices de sanado, [7].

En la Figura 42 se muestra un esquema de las etapas más representativas de esta metodología:

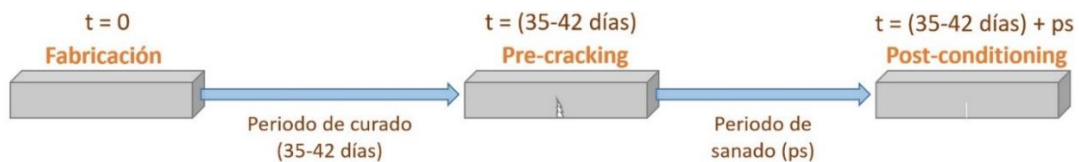


Figura 42. Esquema temporal de los pasos. [Fuente: elaboración propia].

2.5.3.1 Índice de recuperación de la carga (ILR)

Los autores definen el índice de recuperación de la carga según la ecuación **blablá**:

$$ILR = \frac{\sigma_{N,max\ reloading, post-conditioning} - \sigma_{unloading,pre-crack}}{f_{ctf} - \sigma_{unloading,pre-crack}}$$

Donde:

- ILR es el índice de la recuperación de la carga
- $\sigma_{max,reloading,post-conditioning}$: Tensión máxima a la que llega la probeta al recargarla después de la exposición al periodo de sanado.
- $\sigma_{unloading,pre-crack}$: Tensión de descarga de la probeta prefisurada (antes del periodo de sanado)

El sentido físico de esta ecuación se basa en que si se siguiera descargando y cargando continuamente la probeta (curvas azules) estas curvas de carga y descarga formarían una envolvente que marcaría la pérdida de tensión que va dándose en la probeta. De esta forma, si una recarga queda por encima de la tensión de descarga antes de la recarga quiere decir que ha habido una recuperación de la resistencia, implicando el sanado de las fisuras.

De esta forma, ILR podría ser negativo en el caso de que las condiciones de sanado afectaran negativamente a la resistencia de la probeta, mientras que si $ILR > 0$ la probeta habrá sanado.

2.5.3.2 Índice de la recuperación del daño

Los autores definen la siguiente ecuación para evaluar la recuperación de la rigidez:

$$IDR_{(3pb)} = \frac{K_{\text{reloading,post-conditioning}} - K_{\text{unloading,pre-crack}}}{K_{\text{loading,virgin specimen}} - K_{\text{unloading,pre-crack}}}$$

Donde:

- IDR es el índice de la recuperación de la rigidez
- $K_{\text{reloading,post-conditioning}}$: Pendiente de la curva de recarga después de someter a la probeta al periodo de sanado.
- $K_{\text{unloading,pre-crack}}$: Pendiente de la curva de descarga de la probeta prefisurada (antes de exponerla al ambiente de sanado)
- $K_{\text{loading,virgin specimen}}$: Pendiente de la primera curva de carga de la probeta prefisurada.

El sentido físico de esta ecuación es igual que en el caso de ILR pero para la recuperación de la rigidez.

Como se ha podido observar, en este caso los autores no trabajan con dos series de probetas sino con la misma probeta que se carga y se descarga a flexión. Esto podría no tener en cuenta la ganancia de resistencia y rigidez que experimentan las probetas con el paso del tiempo. Sin embargo y como los autores en esta publicación dejan las probetas curar un periodo de entre 35 a 42 días, se supone que las ganancias importantes tanto de resistencia como de rigidez ya se han dado.

Esta metodología si se utiliza con edades de prefisura de las probetas menores (como es el caso de este proyecto) podría inducir a falsos resultados en la evaluación de sanación.

En el artículo no se especifica qué procedimiento se ha seguido para calcular las pendientes de las curvas.

2.5.4 Metodología según investigaciones de S. Z. Qian, J. Zhou y E. Schlangen

En este apartado se expondrá la metodología seguida por S. Z. Qian, J. Zhou y E. Schlangen en su artículo [17]. Los autores desarrollan el programa experimental mostrado en la Figura 43, siendo A las muestras control y X = 14, 28 ó 56 días.

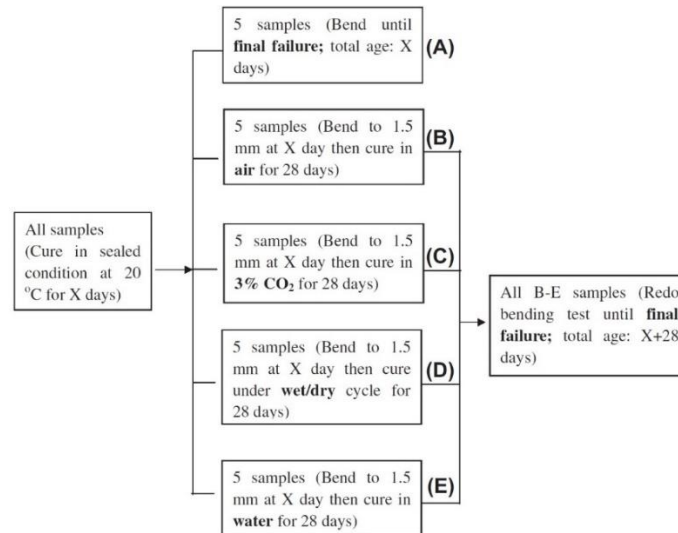


Figura 43. Programa de ensayos a flexión para el estudio de la sanación. (X: edad de prefisura, 14, 28 y 56 días), [17].

El ensayo para determinar el sanado será el ensayo de flexión a 3 puntos. Sin embargo, al no ensayar a flexión las probetas control a una edad igual a la edad de prefisura (14, 28 o 56 días) más el periodo de sanado, y al prefisurarse algunas de estas probetas a edades jóvenes (14 días) puede pasar que resultados de sanación se estén considerando mayores de lo que debiera debido al aumento de resistencia y rigidez de las probetas con el tiempo.

2.5.5 Conclusiones

La metodología de ensayo elegida a tener una influencia notable en los resultados obtenidos por lo que resulta de gran importancia la elección de una metodología que tenga en cuenta los parámetros controlables que influyen en el proceso de sanación.

En este proyecto se ha seguido una metodología propia basada en el borrador del CEN, ya que se van a hacer ensayos de prefisura a edades tempranas (2 días) y se considera que la fabricación e introducción en el ambiente de sanado de probetas de acompañamiento ayudará a tener en cuenta de una manera más precisa los parámetros que pueden influir en el cálculo de la sanación de la fisura. Además se comparará la sanación obtenida con la ecuación del borrador del CEN con una sanación referida a la pendiente de prefisura de la probeta de acompañamiento:

$$R_{stiffness} = \frac{S_{A2}}{S_{B1}}$$

Capítulo 3. Fase experimental

3.2 Programa experimental

El programa experimental llevado a cabo para la consecución de los objetivos anteriormente citados se realizó entre los meses de enero y junio de 2016.

En esta campaña se han realizado ensayos para la verificación de la autosanación y ensayos de control para comparar variaciones entre las amasadas. Los hormigones utilizados son hormigones reforzados con fibras (FRC) para conseguir un mayor control sobre la abertura de fisura y estudiar los comportamientos a flexión.

Para los ensayos para la verificación de la autosanación se fabricaron probetas prismáticas de dimensiones $10 \times 10 \times 50$ cm y se ensayaron a flexión hasta la abertura de fisura deseada (0,1 ó 0,3 mm). Una vez finalizado el periodo de exposición al ambiente de sanado, se repitieron los ensayo a flexión. Esto se realizó tanto a probetas control (sin aditivo cristalino) como a probetas con aditivo cristalino.

El tiempo de exposición de las probetas fisuradas (prefisuradas) al ambiente de sanado de 42 días se consideró basado en las investigaciones expuestas en el Estado del Arte, donde se considera suficiente para que se desarrollen las reacciones de sanado de la fisura.

Esta campaña se diseña con el objetivo de detectar la recuperación de las propiedades mecánicas (tanto carga pico como rigidez) que supondría el sanado de la fisura, diferenciando además el grado de sanación esperable por el mecanismo de sanación autógena (en las probetas control) y el obtenido en las probetas en las que se ha introducido el aditivo cristalino para poder medir la efectividad del uso de aditivos en el proceso de sanación del hormigón.

El ambiente de sanado consistirá en la introducción de las probetas en agua a 30°C . La temperatura del agua es un factor importante en la sanación de las fisuras como se ha visto en el Estado del Arte (Capítulo 2), sin embargo mantener el agua a una temperatura muy alta supone mucha energía y una gran cantidad de evaporación del agua contenida en el tanque, por lo que se decide que 30°C es una temperatura óptima para garantizar el sanado de las fisuras y que sea fácilmente mantenible, basado en la investigación de Marta Roig et al. [16]. Esta exposición se realizará tanto para las probetas de control como para las probetas con aditivo cristalino. Además, para controlar el endurecimiento que experimentan las probetas tanto en control como con aditivo se añadirán probetas de acompañamiento que se expondrán a las mismas condiciones de sanado que las probetas fisuradas a dos días (probetas de acompañamiento de las probetas prefisuradas).

Se estudian varias variables además de la determinación del grado de sanación debido al empleo de aditivos cristalinos, como son la influencia de la abertura de fisura, la cantidad de cemento y la cantidad de fibras. Para ello, se realizarán diferentes tipos de hormigón:

- Hormigón de calidad estándar, que se abreviará como SQ-FRC
- Hormigón de alta calidad/prefabricados, que se abreviará como HQ-FRC
- Hormigón de muy altas prestaciones, que se abreviará como UHPFRC

Estos hormigones presentarán diferentes cantidades de fibras, siendo 40 y 70 kg de fibras en el caso de hormigón de calidad estándar y de calidad alta (SQ-FRC Y HQ-FRC) y 40 y 150 Kg de fibras en el de hormigón de muy altas prestaciones (UHPFRC) para representar el

comportamiento de hormigones con ablandamiento y endurecimiento a flexión, y se obtendrán aberturas de fisura en el ensayo a flexión en el momento de la prefisura de 0,1 mm y 0,3 mm.

Se fijan los siguientes parámetros comunes a todos los tipos de hormigón:

- Tipo y cantidad de aditivo cristalino en función de la cantidad de cemento (8% del contenido en cemento)
- Edad de prefisura de 2 días
- Tiempo de sanado de 42 días
- Ambiente de sanado: inmersión en agua a 30°C
- Tipo de agua utilizada: agua del grifo

Los siguientes parámetros fueron variables de interés en este estudio:

- Dosificación de Aditivo Cristalino: 0% (probetas de hormigón de control, CC) y 8% sobre la cantidad de cemento (probetas de hormigón con aditivo cristalino, CCA).
- Abertura de fisura inicial: 0,1 mm y 0,3 mm
- Tres calidades de hormigón: hormigón estándar, hormigón de alta calidad y hormigón de muy alto rendimiento.
- Contenido de fibras: 40, 70 y 150 kg/m³ en función del tipo de hormigón.

Aunque los aditivos suelen dosificarse en contenidos menores al 5% del peso de cemento, en este trabajo se ha decidido utilizar un 8% para asegurar que si la potencia del aditivo depende de su dosificación la eficacia del mismo esté garantizada para poder estudiar la recuperación de las propiedades mecánicas.

A continuación se muestran en forma de tabla los parámetros anteriores. Sus combinaciones dan lugar a las amasadas definidas para el estudio de la sanación del hormigón (SH). Se incluye el número de probetas por amasada y el número total de probetas que conforman el programa experimental. La primera tabla hace referencia al caso de hormigón de calidad estándar y hormigón de alta calidad (Tabla 1). La segunda tabla al hormigón de muy alto rendimiento (Tabla 2).

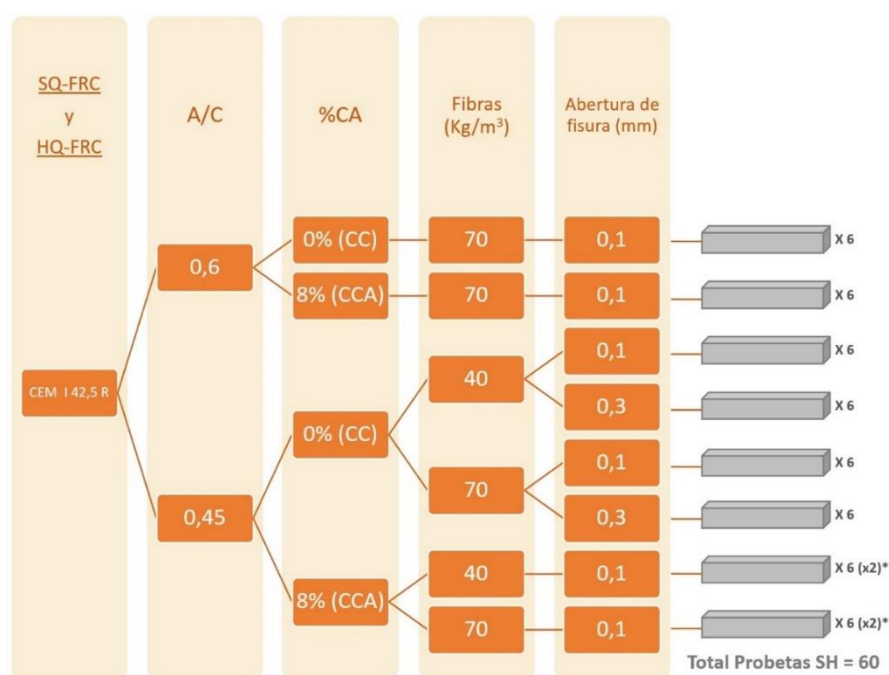


Tabla 1. Amasadas para el estudio de la sanación en el hormigón (SH) en el caso de hormigón estándar (a/c=0,6) y hormigón de alta calidad (a/c=0,45). Número de probetas por amasada y totales.

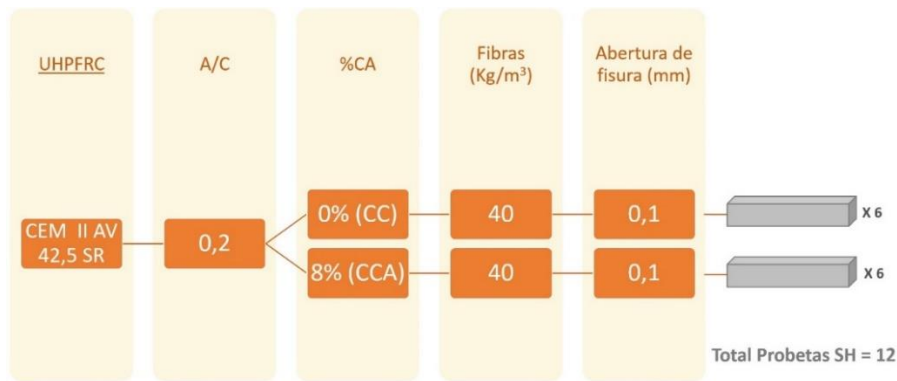


Tabla 2. Amasadas para el estudio de la sanación en el hormigón (SH) en el caso de hormigón de muy alto rendimiento. Número de probetas por amasada y totales.

El ensayo de las probetas destinadas a la evaluación de las propiedades mecánicas antes y después de la exposición al ambiente de sanado (SH) consistirá en un ensayo de flexión a 3 puntos. Se explicará en detalle en el apartado Metodología.

En la tabla 1 las amasadas que tienen un asterisco en el número de probetas (*) se debe a que se tuvieron que realizar dos veces por problemas durante el amasado con el aditivo cristalino, expuestos en el apartado 4.1.2.

Con el fin de caracterizar mecánicamente los hormigones estudiados en este proyecto se realizarán los siguientes ensayos:

- Medida de la consistencia del hormigón fresco según UNE-EN 12350-2 [50].
- Ensayo de compresión según UNE-EN 12390-3 [51].
- Ensayo de flexión a 3 puntos modificado del ensayo según UNE-EN 14651 [52]

La medida de consistencia se hace directamente sobre el hormigón fresco durante su fabricación como se especifica en la normativa.

Para los ensayos de la caracterización de la resistencia a compresión de los hormigones de calidad estándar y alta calidad fabricados en este programa experimental se prevén tres probetas cilíndricas por amasada de diámetro (ϕ) 15 cm y altura (h) 30 cm. Para los hormigones de muy alto rendimiento 4 cúbicas 10×10×10 cm.

En la Tabla 3 se muestran las probetas destinadas los ensayos de caracterización de los hormigones fabricados:

Tipo	Fibras (kg/m ³)	Prismáticas (10x10x50 cm)	Cilíndricas (Φ=15, h=30 cm)	Cúbicas (10x10x10 cm)
SQ-FRC	70	x3	x9	-
HQ-FRC	40	x3	x21	-
HQ-FRC	70	x3	x15	-
UHPFRC	40	x3	-	x16
Total probetas:		x12	x45	x16

Tabla 3. Número de probetas prismáticas, cilíndricas y cúbicas fabricadas para la caracterización de los hormigones. Número por amasadas y total.

Como resumen de todas las amasadas y todas las probetas comprendidas en el programa experimental, tanto de estudio de la sanación del hormigón (SH) como de las probetas usadas para la caracterización de los hormigones fabricados (compresión y flexión a 3 puntos) se expone la siguiente tabla (ver Tabla 4):

	Sanación (SH)	Caracterización	Totales por tipo
Probetas Prismáticas	72	12	84
Probetas Cilíndricas	0	45	45
Probetas Cúbicas	0	16	16
Totales por ensayo	72	73	145

Tabla 4. Amasadas y probetas fabricadas para el estudio de la sanación (SH) y la caracterización de los hormigones.

El número total de probetas fabricadas y ensayadas en este proyecto ha sido de 145, de las cuales 72 han servido para estudiar la autosanación del hormigón, 38 de control y 35 de caracterización de los hormigones fabricados. Sin embargo, el número de probetas fabricadas ha sido mayor debido a varios problemas en las amasadas y en los ensayos.

3.3 Fabricación de los hormigones

Esta sección describe los materiales utilizados en la fabricación de las probetas.

3.3.1 Materiales

3.3.1.1 Cemento

Se utilizaron dos tipos de cemento para la fabricación de los hormigones del programa experimental.

- Cemento para la fabricación de SQ-FRC y HQ-FRC

Para la fabricación de los hormigones de calidad estándar y de alta calidad el cemento utilizado fue un cemento Portland CEM I / 42,5 R suministrado por LAFARGE CEMENTOS, S.A.U (Figura 1 izquierda y derecha). El cemento es de rápida adquisición de resistencias, conveniente para los ensayos a realizar al hormigón ya que se debe fisurar la probeta cuando tiene una edad de 2 días.

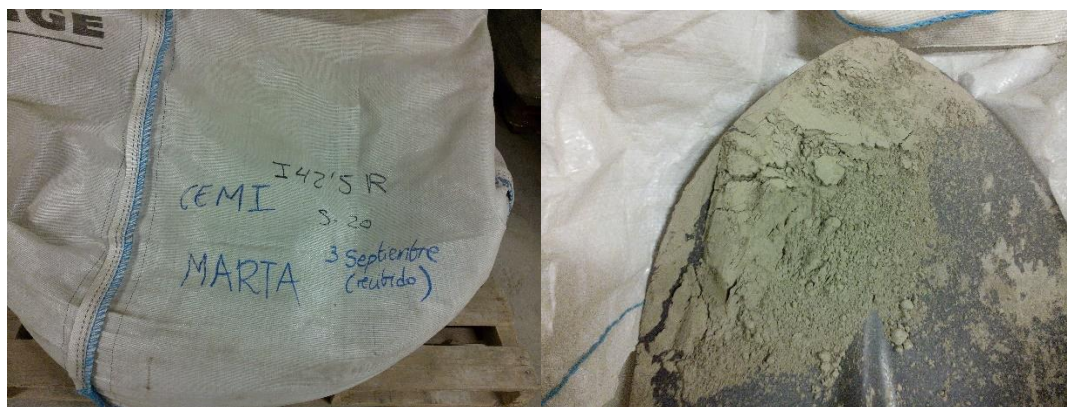


Figura 44. Saca del cemento CEM1 42,5 R utilizado para SFRC y HRFC (izquierda) y muestra de cemento CEM1 42,5 R (derecha).

Según las recomendaciones realizadas por la EHE-08 en el anejo 4 “Recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales”, este tipo de cemento resulta válido para cimentaciones de hormigón armado, obras portuarias y tubos de hormigón, canales y otras aplicaciones hidráulicas pretensadas, considerándose por tanto válido para extrapolar conclusiones a la aplicación en obra por el interés especial del hormigón autosanable en obras hidráulicas o de difícil acceso.

La fecha de recepción del hormigón es del 3 de septiembre de 2015. Pese a que su tiempo aproximado de vida útil manteniendo todas sus propiedades es de 3 meses, su almacenamiento se ha desarrollado en una zona no expuesta a cambios de temperatura y humedad, preservándolo en una saca cerrada. Como se puede observar en la imagen (Fig 2) apenas presenta meteorización por lo que se decide usarlo para esta campaña experimental. Los resultados de los ensayos de control corroboran su buen estado (3.4.2). La meteorización del cemento podría ser un factor importante en la eficacia de las reacciones de sanado del hormigón.

En relación con la relación agua cemento máxima y el contenido de cemento mínimo, se siguen las indicaciones del artículo 37.3 “Durabilidad del hormigón” de la EHE-08. Al ser un hormigón reforzado con fibras de acero se tomarán los valores indicados para hormigones armados.

El ambiente al que va a estar expuesto el hormigón, cámaras de humedad y contacto directo con el agua durante el periodo de sanación, se trata de una clase de exposición 2a. Para hormigón armado y clase de exposición 2a la relación máxima agua/cemento recomendada por la EHE-08 es de 0,6, mientras que el contenido mínimo en cemento es de 275 Kg/m³. Con estos valores de referencia se calculará la dosificación de los hormigones de calidad estándar y de alta calidad para este proyecto.

- Cemento para la fabricación de UHPFRC

Para la fabricación del hormigón de muy alto rendimiento el cemento utilizado fue el CEM II AV 42,5 SR suministrado por LAFARGE CEMENTOS, S.A.U (Fig. y Fig.)



Figura 45. Saca del cemento CEM I 42,5 R utilizado para SFRC y HRFC (izquierda) y muestra de cemento CEM I 42,5 R (derecha).

Respecto a la fabricación de estos hormigones no hay ninguna normativa que especifique dosificación, cantidades o materiales. Sin embargo, hay varias consideraciones que lo van a hacer diferente de los hormigones convencionales:

- Alta cantidad de cemento por m^3 .
- La relación agua/cemento va a ser muy inferior a las dosificaciones de hormigones normales, estando aproximadamente alrededor de 0,2.
- Cemento con bajo contenido en AC_3 .
- $D_{m\acute{a}x}$ de los áridos utilizados < 2 mm.

Para la fabricación de los hormigones de este proyecto, la relación agua/cemento ha sido de 0,2.

3.3.1.2 Agua

El tipo de agua es un factor que puede influir en el proceso de sanado del hormigón debido a su composición. Para este estudio experimental se ha utilizado como agua de amasado y como agua de inmersión para el ambiente de sanado el agua del grifo de Valencia para mayor realismo a la hora de extrapolar resultados a posibles aplicaciones en obra. El pH del agua usada se midió mediante cintas indicadoras del pH, obteniendo el resultado de aproximadamente 7.

Respecto el agua que se añadirá al hormigón como agua de amasado, el agua de la relación agua/cemento fijada por la EHE se corresponde con el agua total, definida así en el Artículo 71, subpartado 71.3.2.4 – “Agua”: “El agua de amasado está constituida, fundamentalmente, por la directamente añadida a la amasada, la procedente de la humedad de los áridos y, en su caso, la aportada por aditivos líquidos”.

Sin embargo, esta agua definida anteriormente no considera la cantidad de agua que será absorbida por los áridos y que por tanto a la hora de fabricar el hormigón no estará disponible

para garantizar el desarrollo correcto de las reacciones de hidratación. El agua definida por la EHE se trataría del agua total, mientras que la convendría utilizar como agua para el amasado sería el agua efectiva. Es por ello por lo que el agua para la relación agua/cemento se considerará el agua efectiva.

Se define a continuación una serie de términos que se consideran importantes:

- Relación agua/cemento (A/C).

Se trata de la relación que guarda el peso del agua con el peso del cemento utilizado en la dosificación del hormigón. Esta relación es una de las características principales del hormigón y va a guardar una estrecha relación con la calidad del hormigón endurecido.

- Agua efectiva.

El agua efectiva es el agua que estará disponible para que se desarrollen las reacciones de hidratación del hormigón. Se puede calcular como la suma del agua a añadir, el contenido en agua de cada árido y el contenido en agua de las adiciones y aditivo, menos el agua que absorberán los áridos y las adiciones.

$$A_{ef} = A_a + G(w_g - A_{bg}) + S(w_s - A_{bs}) + A_{wa}$$

Donde:

A_{ef} = Agua efectiva

A_a = Cantidad de agua añadida

G = Cantidad de cada grava

S = Cantidad de cada arena

A = Cantidad de cada aditivo

w_g = contenido en agua de cada grava

w_s = contenido en agua de cada arena

w_a = contenido en agua de los aditivos

A_{bg} = absorción de las gravas

A_{bs} = absorción de las arenas

- Agua total.

El agua total es la suma del agua a añadir al hormigón, el agua que aportarán los áridos debido a su humedad y el agua que aportará el aditivo. La EHE considera esta agua como el agua de la relación agua/cemento (a/c). Es equivalente al agua efectiva sin tener en cuenta la absorción de los áridos.

- Agua en los áridos.

Esta agua es el agua presente en los áridos debido a su humectación al encontrarse expuestos al ambiente. Este parámetro varía en función de las condiciones ambientales.

Para calcular el agua que aportarán los áridos a la amasada se debe calcular para cada día de amasado la humedad que tienen los áridos que se utilizarán para la fabricación del hormigón, cuyo procedimiento se explicará en detalle en el apartado 3.3.2.

- Agua absorbida por los áridos.

Es el agua que queda retenida en la superficie de los áridos como consecuencia de la capilaridad y de la tensión superficial. Esta depende de la porosidad de las partículas.

- Agua a añadir.

Es el agua que se necesitará añadir para que se cumpla la relación A/C deseada. A efectos de cálculo será la suma del agua efectiva y el agua que absorberán los áridos menos el agua que contienen los áridos como consecuencia de su humedad.

$$Aa = Aef + Aabs(g,s) - Ags - Awa$$

Donde:

Aa = Cantidad de agua a añadir

Aef = Cantidad de agua efectiva

Aabs(g,s) = Cantidad de agua absorbida por los áridos

Ags = Cantidad de agua contenida en los áridos

Awa = Cantidad de agua contenida en los aditivos

3.3.1.3 Áridos

Al igual que en el caso del cemento, se usaron diferentes áridos para hacer los hormigones de estándar y alta calidad y los de muy alto rendimiento.

3.3.1.3.1 Áridos para hormigones de calidad estándar y alta calidad

De acuerdo con la EHE-08 como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse, entre otros, áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), según UNE-EN 12620, rodados o procedentes de rocas machacadas.

Para las amasadas de calidad estándar y alta calidad se utilizarán los siguientes áridos:

GR-7/12 GR-4/7 y arena rodada (ver Figura 46).



Figura 46. Áridos utilizados para hormigones SQ-FRC y HQ-FRC. Grava 7/12 en la bandeja de la izquierda, 4/7 en la del medio y arena en la bandeja de la derecha.

En la Tabla 5. Granulometría de los áridos utilizados en la fabricación de los hormigones de calidad estándar y alta calidad de este proyecto. Tabla 5 se muestra la granulometría en peso que presentan los áridos utilizados para la fabricación de los hormigones.

Tamiz de la serie UNE	% Pasa		
	7/12	4/7	Arena
64	100	100	100
32	100	100	100
16	100	100	100
8	27,1	100	100
4	1	30	95,6
2	1	4,9	80
1	1	1	64,8
0,5	1	1	52,5
0,25	1	1	34,6
0,125	1	1	12,2
0,063	1	1	3,1

Tabla 5. Granulometría de los áridos utilizados en la fabricación de los hormigones de calidad estándar y alta calidad de este proyecto.

Respecto al contenido máximo de finos en el árido grueso y en el árido fino, según la tabla 28.4.1^a “contenido máximo de finos en los áridos” del Artículo 28.4- “Granulometría de los áridos”, subapartado 28.4.1-“Condiciones granulométricas del árido fino total”, la cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 UNE-EN 933-1, expresada en porcentaje del peso de la muestra de árido grueso total o de árido fino total, no excederá los valores de 1,5% en el caso de árido grueso y 6% en el caso de árido fino rodado, que es el caso que nos ocupa. Como puede observarse en la tabla anterior, la curva granulométrica cumple con esta especificación. También cumple con la recomendación especificada en la tabla 28.4.1b “Huso granulométrico del árido fino”.

En la Tabla 6 se muestran las absorciones y densidades características de los áridos que se tomarán para los cálculos de las dosificaciones de los hormigones:

Árido	Absorción %	Densidad (kg/m ³)
7/12	1,7	2600
4/7	1,7	2600
Arena	1	2600

Tabla 6. Absorción (%) y densidad en kg/m³ de los áridos utilizados.

Se muestra a continuación una gráfica con las curvas granulométricas de los áridos y la curva mezcla en comparación con la curva granulométrica teórica de Bolomey (ver Figura 47).

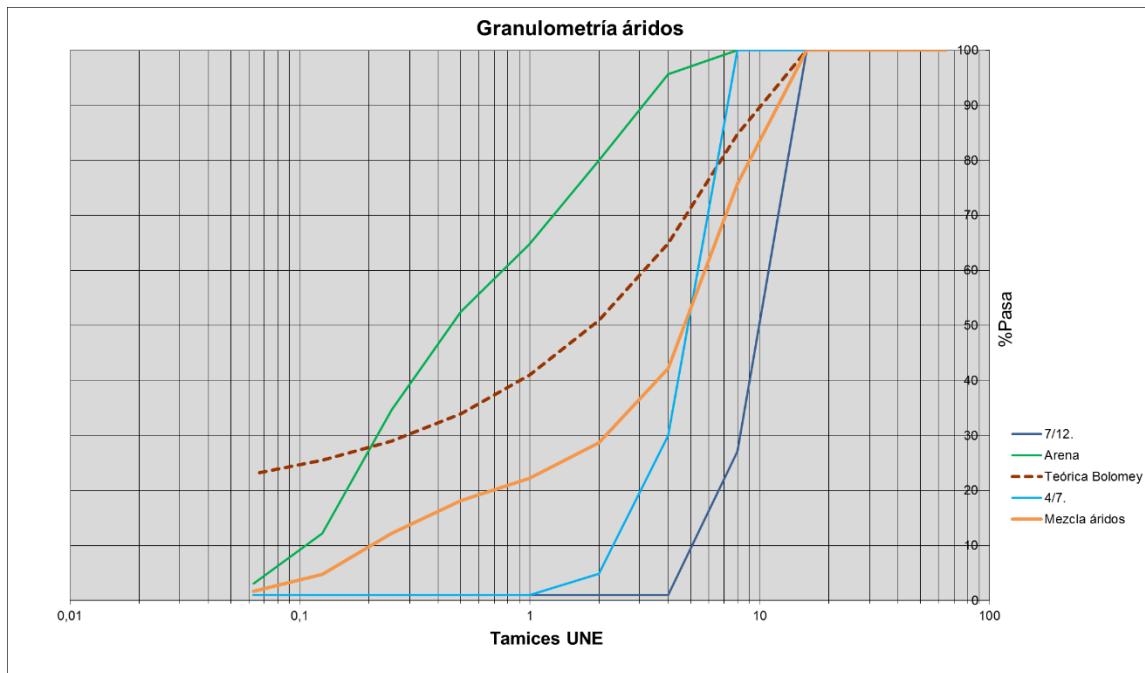


Figura 47. Curva granulométrica de los árido utilizados, de la mezcla y curva teórica de Bolomey.

Como se puede observar en la gráfica, la granulometría de la curva mezcla presenta una carencia, sobretodo, en los tamaños más pequeños de tamiz pudiendo esto ocasionar problemas en la fabricación del hormigón como la segregación al contener menos partículas finas de las que necesitaría la mezcla.

Es por ello por lo que se añadirá filler calizo, cumpliendo las indicaciones del artículo 31.1 de la EHE-08 para hormigones estructurales por las cuales el contenido total en finos del hormigón no puede superar los 175 kg/m^3 .

3.3.1.3.2 Áridos para hormigones de muy alto rendimiento (UHPC)

Los áridos utilizados para la fabricación de los hormigones de muy alto rendimiento han sido áridos silíceos por su alta resistencia mecánica. Son los siguientes:

- Harina de sílice (05-500) (harina de cuarzo)

La utilización de la harina de cuarzo (SiO_2 cristalino) permite reducir el volumen de cemento y obtener una curva granulométrica continua en los tamaños más pequeños.

Tiene la misma composición química que la arena silícea pero con un tamaño de grano intermedio entre el cemento y la arena, por lo que su adición aporta mayor compacidad, estabilidad y durabilidad a los hormigones. [53]

Para este proyecto se ha utilizado la harina de cuarzo U-S 500, proporcionada por SIBELCO HISPANIA (ver Figura 48).



Figura 48. Harina de cuarzo U-S 500, SILBECO HISPANIA

- Humo de sílice (940-U)

El humo de sílice es un subproducto pulverulento esferoidal procedente de la fabricación en hornos eléctricos del silicio y del ferrosilicio a partir del cuarzo, caliza y hierro. Es un producto imprescindible en los hormigones de muy alto rendimiento. Su añade al hormigón para que reaccione con el hidróxido cálcico procedente de los compuestos activos del cemento y produzca un aumento de la resistencia mecánica. [53]

El utilizado en este proyecto es humo de sílice Elkem Microsilica 940 U sin densificar (ver Figura 49).

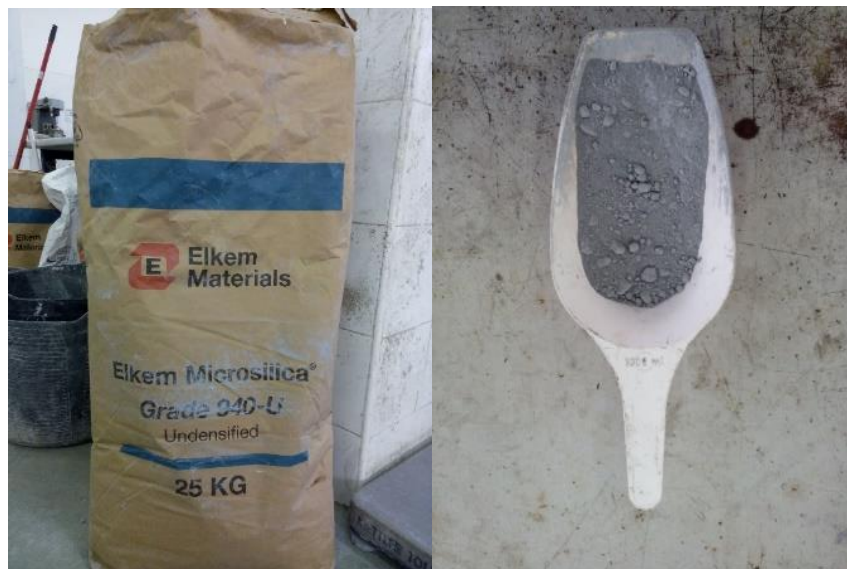


Figura 49. Humo de sílice Elkem Microsilica 940-U.

- Arena 0,4 mm y arena de 0,8 mm

Los tipos de arena utilizados se muestran en la Figura 50 izquierda y derecha



Figura 50. Fotografías de la arena 0,4 mm (izquierda) y de la arena 0,8 mm (derecha) utilizadas para la fabricación de UHPFRC.

3.3.1.4 Superplastificantes

Los aditivos superplastificantes se utilizan para, teniendo una relación agua/cemento dada para la dosificación, poder mejorar la trabajabilidad del hormigón sin comprometer su resistencia.

Para la fabricación de los hormigones de este estudio se han utilizado dos tipos de superplastificantes:

- Sika Viscocrete 5980

Se usa este aditivo líquido para los hormigones de calidad estándar y alta calidad, con una dosificación alrededor del 1,9% respecto al peso del cemento para todas las amasadas (ver Figura 51).



Figura 51. Aditivo superplastificante líquido Sika Viscocrete 5980 utilizado para SQ-FRC y HQ-FRC.

- Sika ViscoCrete-225 P para los de muy alto rendimiento

Se usa este aditivo en polvo en los hormigones de muy alto rendimiento. La cantidad de aditivo añadida respecto al peso en cemento es de 1,25% (ver Figura 52).



Figura 52. Aditivo superplastificante en polvo Sika ViscoCrete-225P

3.3.1.5 Fibras

En los hormigones fabricados las fibras se añaden con dos finalidades: la principal es estudiar el comportamiento a flexión de las probetas en función de la cantidad de fibras por m^3 , obteniendo así comportamientos de ablandamiento y endurecimiento a flexión. La otra es para hacer de la abertura de fisura un parámetro controlable y más estable a lo largo del tiempo.

A pesar de que como se ha visto en el capítulo 2 “Estado del Arte” las fibras de PVA son las que más precipitados garantizan en la fisura y por tanto mayor sanación, como este proyecto se centra en estudiar la efectividad de los aditivos cristalinos se decide que las fibras sean de acero.

Las cantidades de fibras a estudiar serán de 40 y 70 kg/m^3 en el caso de hormigones de calidad estándar y alta calidad y 40 y 150 kg/m^3 en el caso de hormigones de muy alto rendimiento. Las fibras utilizadas para los hormigones de calidad estándar y alta calidad son fibras 65/35 de 35 mm de longitud y diámetro 0,55 mm (ver Figura 53).



Figura 53. Fibras 65/35 para hormigones SQ-FRC y HQ-FRC

Las fibras utilizadas como refuerzo de los hormigones de muy altas prestaciones son fibras metálicas de alto límite elástico, con 13 mm de longitud y un diámetro de 0,2 mm (ver Figura 54).



Figura 54. Fibras metálicas de 12mm y alto límite elástico usadas para los hormigones UHPFRC.

3.3.1.6 Aditivos Cristalinos (C.A)

Los aditivos cristalinos usados son el aditivo W (Figura 55 izquierda) y el aditivo X (Figura 55 derecha).



Figura 55. Aditivos cristalinos utilizados en la realización de este trabajo. Aditivo Cristalino W (izquierda) y Aditivo Cristalino X (derecha).

3.3.2 Dosificación

Para fabricar los hormigones descritos para este proyecto se usarán los materiales descritos en el apartado 3.3.1 “Materiales”.

- Ajuste de la curva granulométrica

En los hormigones de calidad estándar y alta calidad, para dosificar correctamente los áridos se ajusta la curva granulométrica de la mezcla de los áridos con cemento a la curva granulométrica

teórica de Bolomey (incluye el cemento como un árido más), realizando un ajuste por mínimos cuadrados.

La curva teórica de Bolomey sigue la siguiente ecuación:

$$y = a + (100 - a) * (d/D)^{1/2}$$

Donde:

A = Parámetro de Bolomey

D = Diámetro máximo

Para las dosificaciones de los hormigones que conciernen a este proyecto los parámetros serán: a=17; D=12.

La cantidad máxima de filler que se puede utilizar va a estar condicionada por la cantidad de aditivo cristalino usado en las probetas con aditivo cristalino (CCA) ya que como es un material muy fino tendrá el mismo efecto sobre la trabajabilidad del hormigón que el filler. Para controlar esto, se fija que la cantidad conjunta de filler y aditivo cristalino sea igual a 50 kg/m³.

Para comprobar la validez del ajuste de la curva obtenida a la teórica de Bolomey se realiza un ajuste por mínimos cuadrados, obteniendo valores en torno a 3. Como los resultados son inferiores a 4, se considera que el ajuste es bueno.

Respecto a los demás parámetros de la dosificación como son las fibras, el agua y el superplastificante, como se ha comentado anteriormente en el apartado 3, subapartado 3.5 “Fibras”, se usan dos cantidades de fibras de acero 65/35 en kg/m³ con la finalidad de poder estudiar los diferentes comportamientos a flexión de ablandamiento y endurecimiento. En lo referente al agua se utilizará el agua efectiva y la cantidad de aditivo fluidificante estará en torno al 1.9% del peso de cemento.

En las siguientes tablas se muestran las dosificaciones de los hormigones de calidad estándar (Tabla 7 izquierda) y de los hormigones de alta calidad (Tabla 7 derecha).

Hormigón calidad estándar		Hormigón de alta calidad	
Material	Kg/m ³	Material	Kg/m ³
Cemento I/42,5 R	275	Cemento I/42,5 R	350
Agua (efectiva)	165	Agua (efectiva)	157,5
Grava (4-12 mm)	904	Grava (4-12 mm)	968
Arena	981	Arena	849
Fibras (RC-65/35)	40/70	Fibras (RC-65/35)	40/70
Superplastificante Sika 5980	6,65	Superplastificante Sika 5980	6,65
Filler + Aditivo Cristalino	50	Filler + Aditivo Cristalino	50

Tabla 7. Dosificación de los hormigones de calidad estándar (izquierda) y de alta calidad (derecha) en kg/m³.

En el caso de los hormigones de muy alto rendimiento (UHPRFC) la dosificación en kg/m³ es la siguiente (ver Tabla 8):

Hormigón de muy alto rendimiento	
Material	Kg/m ³
Cemento II/42,5 AV R	800
Agua	175
Harina de cuarzo (05-500)	225
Humo de sílice (940-U)	175
Arena 0,4 mm	301,67
Arena 0,8 mm	553,33
Superfluidificante (225 P)	10
Fibras (12 mm)	40

Tabla 8. Dosificación de los hormigones de muy alto rendimiento en kg/m³.

- Humedad de los áridos

Un paso importante previo a la fabricación de los hormigones de calidad estándar y alta calidad es la corrección de la humedad de los áridos.

Como se ha explicado anteriormente en el apartado 2 “*Materiales*” subapartado 3.2 “*Agua*”, la cantidad de agua que proporcionen los áridos a la amasada dependerá de la absorción de los áridos y de las condiciones del ambiente en el que se almacenen, siendo que esta última es variable en el tiempo. Es por ello por lo que es necesario antes de calcular la dosificación para la amasada calcular la humedad que tienen los áridos.

Para calcular la humedad de los áridos se procede de la siguiente forma:

Con 24 horas de antelación se apartan capazos de las gravas y de la arena con la cantidad aproximada de áridos que se utilizan normalmente para hacer esa amasada más 3 kg. De los capazos con los áridos apartados extraeremos unas muestras de aproximadamente 1 kg. Sobre todo en el caso de la arena es importante que esta muestra sea representativa de la arena que se ha apartado en los capazos, por lo que se mezclará bien previamente de extraer la muestra. Estas muestras de arena y grava se pesarán, anotando el resultado (que será el peso húmedo) y se introducen en el horno a 120°C para que se sequen. Los capazos con los áridos separados se cubren con una bolsa para evitar que haya una gran variación de humedad. 24 horas después de introducir las muestras en el horno se extraen y se pesan obteniendo así el peso seco de los áridos. Con estos pesos húmedos y pesos secos se calculará la humedad de los áridos mediante la siguiente fórmula:

$$W(\%) = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

Los valores de las humedades calculadas para la fabricación de los hormigones de este proyecto han variado entre 0,18 y 0,87 en el caso de las gravas 7/12, entre 0,1 y 0,96 en el caso de las gravas 4/7 y 0,3 y 3,07 en el caso de las arenas.

En el caso de la fabricación de los hormigones de muy alto rendimiento este procedimiento de cálculo de la humedad y separación previa de material no es necesario debido a que están en sacas cerradas y no experimentan variaciones de humedad.

3.3.3 Proceso de fabricación

- Amasado

Una vez se ha calculado la humedad de los áridos que se van a utilizar para la amasada se procede a la separación del material corregido necesario para la amasada en función de los litros de amasada necesarios.



Figura 56. Material separado para la fabricación de hormigón SQ-FRC o HQ-FRC a la izquierda y parte del material separado para la fabricación de hormigón UHPFRC a la derecha.

Para la fabricación de las probetas es necesario contar con los moldes del tamaño y forma adecuada, convenientemente limpios y con una capa de desencofrante aplicada para que el hormigón al fraguar no se adhiera a la superficie de los moldes. En las imágenes Figura 57 izquierda y derecha se muestran los moldes utilizados para la fabricación de las probetas prismáticas y cúbicas y para la fabricación de las probetas cilíndricas:



Figura 57. Moldes para la fabricación de probetas prismáticas y cúbicas (izquierda) y probetas cilíndricas (derecha).

Para las amasadas para el estudio de la sanción de las fisuras (SH) se fabrican 6 probetas prismáticas $10 \times 10 \times 50$ cm y 3 probetas cilíndricas en el caso de hormigones de calidad estándar y alta calidad, mientras que si se trata de hormigón de muy alto rendimiento se realizarán 6 probetas prismáticas de las mismas dimensiones y 3 probetas cúbicas de dimensiones $10 \times 10 \times 10$ cm.

El proceso de amasado de los hormigones de calidad estándar y alta calidad consta de las siguientes fases:

- Humectación de la amasadora.

Con este proceso se pretende evitar que el acero de la superficie de la amasadora pueda absorber agua de la amasada.

- Vertido de los áridos gruesos y la arena junto con la mitad del agua total que se añadirá a la amasada.
- Amasado durante 12-15 minutos para que los áridos absorban el agua.
- Vertido del filler, cemento y si corresponde aditivo cristalino. Dejar amasar durante 1 minuto.
- Añadir el resto del agua durante 1 minuto y dejar amasar 1 minuto.
- Añadir el superplastificante y dejar amasar durante 3-4 minutos con la finalidad de que reaccione.
- Adición de las fibras. Se deja amasar 3-4 minutos, hasta que se vean las fibras recubiertas por la pasta de hormigón.

La Figura 58 consta de dos fotos donde se muestra el aspecto del hormigón en dos etapas diferentes del amasado.



Figura 58. Foto de la fase 3 (amasado de los áridos junto con la mitad del agua) en la fotografía de la izquierda y amasado de los áridos, el agua tota, el cemento y el superplastificante correspondiente a la fase 6 en la derecha.

El proceso de amasado de los hormigones muy alto rendimiento consta de las siguientes fases:

- 1'. Humectación de la amasadora.

Esta práctica es especialmente importante en la fabricación de hormigones de muy alto rendimiento ya que son muy sensibles a las variaciones de agua.

- 2'. Vertido del cemento, la harina de cuarzo, el humo de sílice, las arenas y el aditivo cristalino si procede.

Como la cantidad de aditivo cristalino a añadir en la amasada está relacionada con la cantidad de cemento de la amasada en el caso de los hormigones de muy alto rendimiento

la cantidad de aditivo cristalino es muy grande (rondando los 3 kg), de forma que la mezcla necesitará más agua para llegar a la consistencia deseada por la cantidad de material que se está añadiendo.

3'. Dejar amasar hasta que se haga una mezcla homogénea.

4'. Adición de la mitad del 90% del agua a añadir y dejar amasar.

Esto se debe a que el humo de sílice 940-U es propenso a formar bolas y no mezclarse bien con los demás componentes al hidratarse. Para evitar problemas de mala homogeneización se procederá a hacer un hormigón seco al principio para garantizar que las bolas que se formen se deshagan.

5'. Adición de la otra mitad del 90% del agua.

6'. Adición del 80% del superplastificante 225 P y dejar amasar.

Hasta aquí el hormigón sigue igual de seco aunque se le haya añadido ya prácticamente toda el agua que necesita. El aditivo actuará haciendo que el agua del cemento se separe de las partículas del cemento para que esté disponible para la reacción en la pasta. Se añade el 80% porque interesa que siga seco para deshacer las bolas que no se hayan deshecho aún.

7'. Añadir el 20% del superplastificante restante y dejar amasar hasta que el hormigón cambie drásticamente de consistencia (ver Figura 59).



Figura 59. En la figura de la izquierda se observa el momento de la adición del superplastificante, mientras que en la derecha se puede observar cómo ha cambiado ya el aspecto del hormigón.

8'. Añadir el 10% del agua restante. Se puede añadir mas o menos en función de la consistencia que se desee.

9'. Añadir las fibras de alto límite elástico y dejar amasar hasta que se homogeneice la mezcla.

- Relleno de los moldes

El relleno de forma adecuado de los moldes es un paso muy importante en la fabricación de las probetas ya que un mal relleno puede suponer la aparición de coqueas y por consiguiente la pérdida de resistencia de las probetas.

El relleno de los moldes tanto cilíndricos como prismáticos se hace siguiendo el proceso expuesto en la norma UNE-EN 12390-2 y UNE-EN 14651:2005+A1:2007 respectivamente.

En el caso de las probetas cilíndricas el hormigón se verterá en tres capas de espesor aproximadamente un tercio de la altura del molde. Cada vez que se finalice el vertido de una capa se procederá a la compactación de la misma mediante 25 golpes con la varilla compactadora, bien distribuidos por toda la superficie de la capa, atravesándola y sin que llegue a tocar el fondo del molde en el caso de la primera capa. En las dos capas siguientes es importante que la varilla penetre en la capa de abajo pero sin llegar a traspasarla del todo.

En el caso de las probetas prismáticas el hormigón se verterá como indica Figura 60. “El tamaño del incremento elemental 1 debería ser el doble que el del incremento elemental 2. El molde debe rellenarse hasta aproximadamente el 90% de la altura de la probeta antes de la compactación y debe completarse y enrasarse mientras se compacta. La compactación debe realizarse mediante vibración externa” UNE-EN 14651:2005+A1:2007.

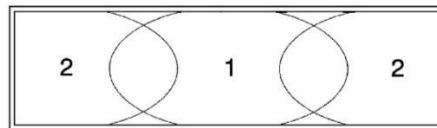


Figura 60. Orden de relleno del hormigón en probetas prismáticas según la UNE-EN 14651:2005+A1:2007

A pesar de que en la misma normativa especifica que el hormigón se debe compactar mediante vibración externa en el caso de este proyecto se ha realizado con la varilla de picar, proporcionando 25 golpes a cada zona de relleno.

Una vez acabado el relleno de los moldes, estos se almacenan y se deja curar el hormigón en el molde durante 24 horas (ver Figura 61 izquierda). Pasadas las 24 horas en las cuales el hormigón ha adquirido suficiente resistencia como para poder desmoldarlo, se desmolda (ver Figura 61 derecha), se limpian los moldes y se almacenan las probetas los días correspondientes hasta que se tengan que ensayar, siendo este periodo en el caso de las probetas prefisuradas y de acompañamiento un día, en el caso de las probetas de compresión y de caracterización 27 días.



Figura 61. Probetas fabricadas. Probetas con el hormigón aún fresco (izquierda) y probetas desmoldadas que están siendo preparadas para almacenar en cámara de humedad (derecha)

El almacenaje de las probetas una vez estén desmoldadas se realizará en cámara de humedad en la cual la temperatura se mantiene a 20°C y la humedad relativa al 95%. La Figura 62 muestra varias probetas almacenadas en cámara de humedad, siendo las de la izquierda probetas pertenecientes a hormigones de calidad estándar y alta calidad y las de la derecha hormigones de muy alto rendimiento.



Figura 62. Probetas almacenadas en cámara de humedad. Probetas de hormigones de calidad estándar y alta calidad mientras (izquierda) y probetas de muy alto rendimiento (derecha).

Como se puede observar, las probetas de los hormigones de muy alto rendimiento tienen un color mucho más oscuro, casi negro. Esto se debe al contenido en humo de sílice característico de los hormigones de UHPFRC.

3.4 Ensayos de caracterización de los hormigones

Para la caracterización de los hormigones fabricados se han realizado diferentes ensayos. Durante la fabricación de las amasadas se realizaron ensayos de control sobre el hormigón fresco para garantizar una homogeneidad entre los hormigones. Se realizaron también ensayos de control de la resistencia sobre el hormigón endurecido. Para la caracterización a flexión de los hormigones con fibras se realiza el ensayo de flexotracción UNE-EN14651:2007+A1 modificado.

3.4.1 Ensayo de control sobre hormigón fresco

Los ensayos sobre el hormigón fresco que se ejecutan son ensayos de control que se realizan para asegurar la homogeneidad de las amasadas, de forma que se asegure la representatividad de los resultados.

En el caso de los hormigones de calidad estándar (SQ-FRC) y de alta calidad (HQ-FRC) el ensayo sobre el hormigón fresco que se realiza es el ensayo de consistencia o cono de Abrams según la norma UNE-EN 12350-2:2009.

Este ensayo consiste en el relleno en tres capas de hormigón fresco del molde troncocónico de dimensiones normalizadas destinado para este ensayo y posterior liberación del hormigón, midiéndose el descenso producido por la masa de hormigón al ser liberado del molde. El valor del asiento en cm se corresponderá con un tipo de consistencia.

Antes del relleno del cono se procede a su humectación, así como la de la varilla compactadora y la base. El relleno del molde troncocónico se realizará en tres capas de espesor aproximadamente un tercio de la altura del molde. Al acabar el vertido de cada capa se compactará la capa con una barra compactadora metálica con la parte redondeada hacia el hormigón, dando 25 golpes. Los golpes deben repartirse uniformemente por toda la superficie y penetrando la varilla en el espesor de la capa pero sin golpear la base (ver Figura 63).



Figura 63. Imagen del proceso de relleno del cono de Abrams.

Una vez finalizado el relleno del molde se procede a liberar el hormigón, levantando el molde verticalmente en un movimiento continuo y se mide el descenso que experimenta el hormigón como se muestra en la Figura 64:

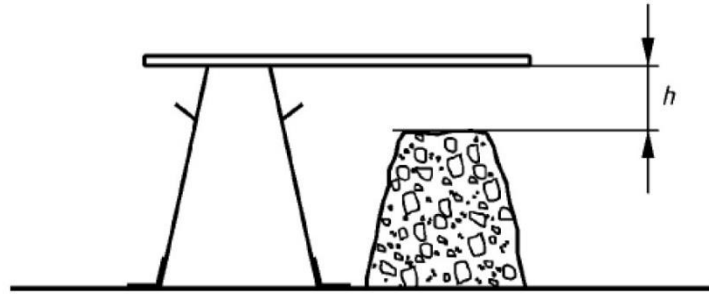


Figura 64. Medida del asiento que experimenta el hormigón según UNE-EN 12350-2:2009.

Según la EHE-08, con el valor del asiento experimentado en cm \pm 2 cm de tolerancia se obtendrá el tipo de consistencia. La relación entre asiento y consistencia se muestra en la Tabla 9.

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

Tabla 9. Tabla de consistencias según Artículo 31.5 de la EHE-08

Para este proyecto se ha considerado que la consistencia para las amasadas sea la fluida, garantizando la facilidad de manejo y fabricación de las probetas. Para que se pueda considerar consistencia fluida el asiento debe de estar entre los 8 y los 17 cm.

Para el caso de los hormigones de muy alto rendimiento (UHPFRC) al ser un hormigón autocompactante el control del hormigón en estado fresco se estudiará con el ensayo del escurrimiento especificado en la norma UNE-EN 12350-8.

Este ensayo consistirá en el relleno del molde troncocónico sobre el centro de la placa base normalizada, nivelada y con la superficie limpia. Una vez se haya rellenado el cono con el hormigón fresco sin aplicarle ningún tipo de vibración o compactación mecánica, se levanta el cono y se deja escurrir el hormigón, que formará una torta como la mostrada en la figura blablá. Cuando se haya estabilizado el diámetro de la torta se mide el diámetro en mm, siendo este valor el escurrimiento (SF), (ver Figura 65).



Figura 65. Medida de la consistencia de los hormigones de muy alto rendimiento (UHPFRC).

3.4.2 Ensayo de control sobre hormigón endurecido

Para la realización de estos ensayos se fabrican 3 probetas cilíndricas por cada amasada de hormigones de calidad estándar y alta calidad y 4 probetas cúbicas por cada amasada de hormigón de muy alto rendimiento.

Para la determinación de la resistencia a compresión de las probetas se procederá como marca la normativa UNE-EN 12390 “*Ensayos de hormigón endurecido*” Parte 3 “*Determinación de la resistencia a compresión de probetas*”.

Los ensayos se realizan con la prensa hidráulica de control manual que se muestra en la Figura 66:



Figura 66. Prensa hidráulica manual utilizada en los ensayos de compresión.

En el caso de las probetas cilíndricas se garantizará una superficie de apoyo regular con el plato superior de la prensa mediante el refrentado con mortero de azufre según el Anexo A apartado A.4 “*Refrentado. Método del mortero de azufre*” de la UNE-EN 12390. En la Figura 67 se puede ver tres probetas refrentadas (izquierda) y tres probetas rotas (derecha).



Figura 67. Probetas recién refrentadas en la imagen de la izquierda y probetas refrentadas ya ensayadas a compresión en la imagen de la derecha.

En el caso de las probetas cúbicas no es necesario refrentar o pulir la superficie siempre y cuando la superficie del acabado superficial de la probeta (la superficie no encofrada) no esté en contacto con ninguno de los dos platos de la prensa de forma que se garantice una superficie de apoyo regular. En la Figura 68 se pueden observar dos fotografías de probetas cúbicas de hormigón de muy alto rendimiento después de ensayarse a compresión:



Figura 68. Probetas cúbicas de hormigón de muy alto rendimiento después de romperlas a compresión (izquierda y derecha).

Cuando las dimensiones o forma de las probetas no cumplan con los requisitos dados en la Norma EN 12390-1 porque exceden de sus respectivas tolerancias, deben rechazarse, ajustarse o ensayarse de acuerdo con el anexo B.

3.4.3 Ensayo a flexotracción según UNE-EN modificado

Para caracterizar a flexión los hormigones con fibras del proyecto se fabricaron cuatro amasadas, una por cada tipo de hormigón utilizado. Las probetas fabricadas por cada amasada fueron 3 prismáticas (10×10×50 cm) y 3 cilíndricas (de control), excepto en el caso de la amasada de hormigón de muy alto rendimiento que fueron cúbicas. Las probetas prismáticas se ensayaron a flexión según una modificación de la UNE-EN 14651:2007+A1 para adaptarla a probetas de menor tamaño.

El proceso seguido para la realización de este ensayo es el siguiente:

- 1') Dosificación del hormigón (día 0)
- 2') Fabricación del hormigón y de las probetas (día 0).
- 3') Rotura a compresión de las probetas cilíndricas (día 28).
- 4') Entalla y ensayo a flexión a 3 puntos de las probetas prismáticas según la modificación de la norma UNE-EN 14651

Según esta normativa, “el comportamiento a tracción del hormigón con fibras metálicas se evalúa en términos de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión determinados a partir de la curva carga-desplazamiento del borde de la fisura (CMOD) o de la curva carga-flecha, obtenida aplicando una carga puntual concentrada sobre un prisma con entalla simplemente apoyado”.

En este proyecto se ha obtenido la curva carga-CMODy mediante la medición con una galga extensiométrica (LVDT) a lo largo del eje longitudinal de la probeta como se indica en la modificación de la normativa UNE-EN 14651 y que se muestran en la Figura 69. Además, se ha obtenido la curva carga-flecha que proporciona la INSTRON.

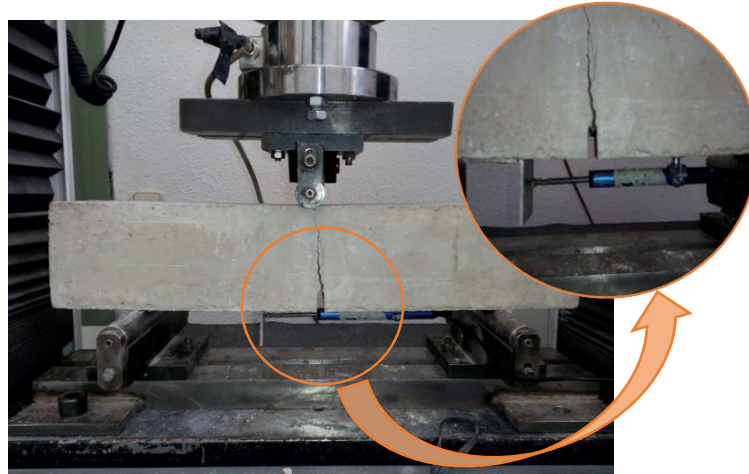


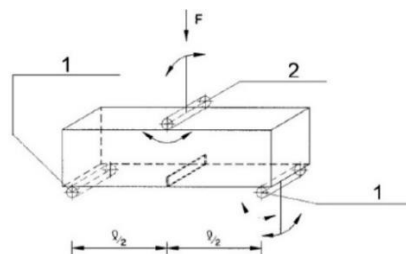
Figura 69. Probeta con galga extensiométrica.

Para la colocación de la galga se realizan dos agujeros en la probeta separados entre ellos 16 cm y estando a una distancia del centro de la probeta cada uno de 8 cm (ver Figura 70). La distancia entre los apoyos es del 35 cm.



Figura 70. Preparación de la probeta para la colocación de la galga extensiométrica.

La colocación de la probeta en la prensa se realiza conforme a la UNE-EN 14651:2005+A1:2007 siendo $l/2$ 17,5 cm (ver Figura 71).



- Leyenda
- 1 Rodillo de apoyo
 - 2 Rodillo de carga

Figura 71. Configuración de la carga sobre la probeta para el ensayo de flexotracción a 3 puntos, [52].

Una vez colocada la probeta en la prensa se procede al ensayo, que se basará en la carga de la probeta a una velocidad constante de 0,03 mm/min hasta que el valor del CMOD sea igual a 0,5 mm. En este momento se para el ensayo y se cambia a velocidad de 0,13mm/min. El ensayo finaliza cuando el valor del CMOD sea de 4 mm, obteniendo una curva similar a la de la Figura 72.

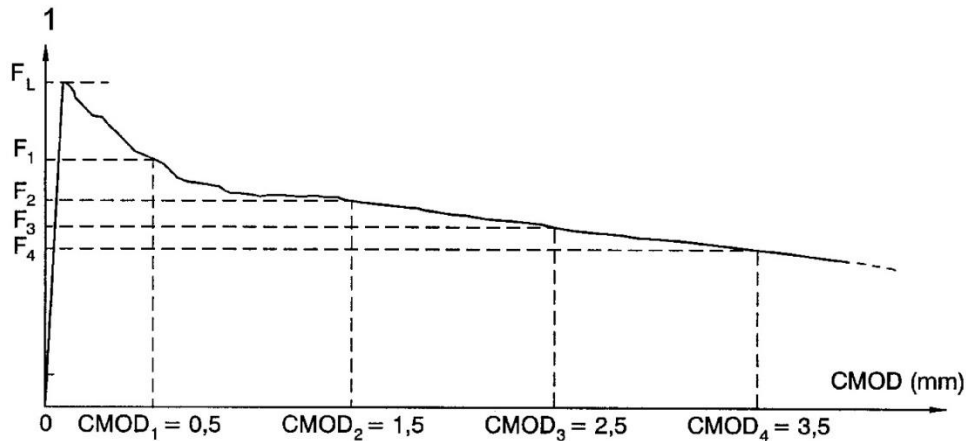


Figura 72. Diagrama carga-CMOD, [52].

Para los valores de CMOD de 0,5; 1,5; 2,5 y 3,5 mm se obtendrán las resistencias residuales a tracción ($f_{R,j}$) con un error de 0,1 N/mm².

Sin embargo, debido a la colocación del captador los valores medidos por el mismo no son el CMOD, sino el CMOD_y.

Es por ello por lo que hay que hacer una conversión del CMOD_y al CMOD como propone la UNE:

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{h}{h + y}$$

Para este proyecto $y = 114$ mm debido a la abrazadera que sujeta la galga extensiométrica a la probeta. Una vez se han convertido los valores de CMOD_y por CMOD se calculan las resistencias residuales para F_j (CMOD=0,5;1,5;2,5 y 3,5) como se indica en la siguiente fórmula:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

Los valores de la resistencia residual $f_{R,j}$ que servirán para la caracterización de los hormigones con fibras son los correspondientes a CMOD =0,5 mm y CMOD = 3,5 mm.

Se elabora un documento Excel para el cálculo de las resistencias residuales de la forma más automatizada posible (ver Figura 73):

3.5 Estudio de la capacidad de autosanación (Self-Healing)

La metodología general de este proyecto se basa en la fabricación de los hormigones anteriormente explicados (calidad estándar, alta calidad y hormigón de muy alto rendimiento) añadiéndoles aditivo cristalino en el amasado (CCA) y sin añadirlo (CC). Las probetas se ensayan a flexotracción a 3 puntos con la finalidad de obtener las gráficas carga-flecha y calcular las características mecánicas de las probetas fabricadas (rigidez y carga pico) antes y después de la exposición al periodo de sanado. Con estos datos se evalúa la tanto la sanación autógena de los hormigones fabricados como la sanación debido a la adición del aditivo cristalino y comparar así la efectiva del uso del aditivo cristalino.

Para cada amasada se fabrican 6 probetas prismáticas $10 \times 10 \times 50$ cm y 3 probetas cilíndricas ($\phi=15$ cm y $h=30$). Las probetas prismáticas se destinarán al ensayo de flexión a 3 puntos para obtener las gráficas carga-flecha de las probetas. Estas probetas se dividen en dos series: 3 probetas prismáticas que serán las prefisuradas a 2 días y tres probetas prismáticas de acompañamiento. Debido a que las probetas se prefisuran a una edad muy temprana (2 días), se decide la introducción de una probeta de acompañamiento para controlar el aumento de rigidez y de resistencia que experimentarán debido a la edad y no confundirlo con el sanado de la fisura.

Las probetas a las que se llamarán prefisuradas se entallan y ensayan a los dos días de la fabricación. Posteriormente se introducen en el ambiente de sanado durante 42 días. Una vez finalizado el periodo de exposición al ambiente de sanado se vuelven a ensayar.

En el caso de las probetas de acompañamiento, no se entallan y prefisuran a los dos días sino que se introducen en el ambiente de sanado al mismo tiempo que las de prefisura sin haber sido ensayadas. Una vez finalizado el periodo de exposición al ambiente de sanado se ensayan.

Esta metodología se muestra en la Figura 74:

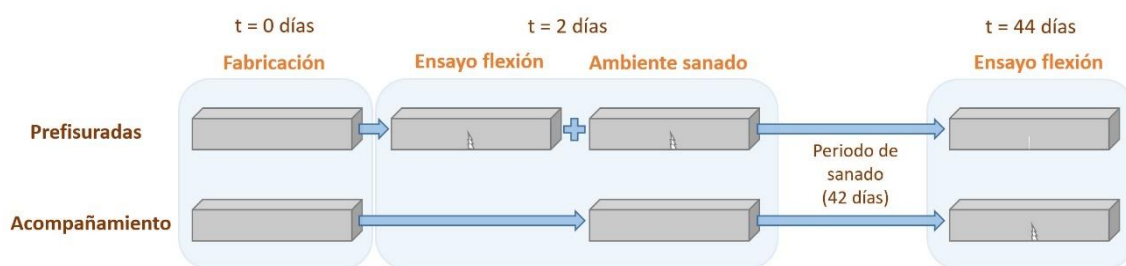


Figura 74. Método seguido para los ensayos de sanación (SH).

Respecto al ensayo a flexión, las probetas prefisuradas a 2 días se cargan hasta que fisuran y esta fisura alcanza la abertura de fisura deseada. Posteriormente la probeta se descarga de forma controlada. Una vez que estas probetas prefisuradas han estado expuestas 42 días al periodo de sanación se las vuelve a ensayar a flexión, realizando una recarga hasta llegar a la ruptura de la probeta.

En el caso de las probetas de acompañamiento, una vez finalizado el periodo de sanación, se entallan y se fisuran llegando hasta la abertura de fisura obtenida en las probetas a las que acompañaban. Una vez alcanzada la abertura de fisura deseada se procede a una descarga controlada. Una vez la probeta esta descargada, se espera 10 minutos a la recuperación de la probeta y se vuelve a cargar hasta llegar a la rotura de la probeta.

Estos procesos de carga y descarga de las probetas de prefisura y acompañamiento se muestran en las gráficas carga-flecha de la siguiente figura, especificando el momento en el que se realizan los ensayos (ver Figura 75):

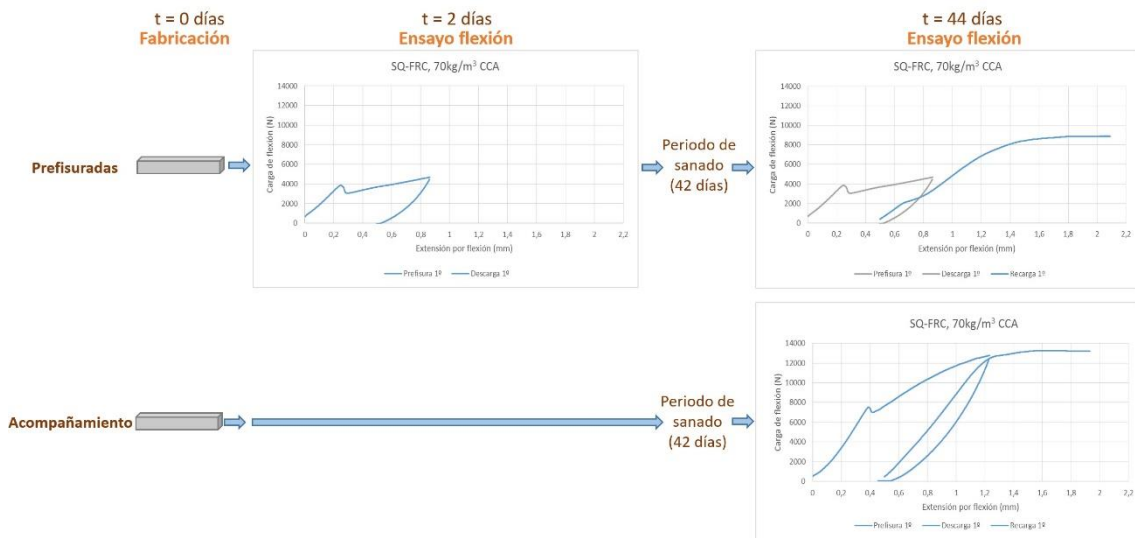


Figura 75. Procesos de carga, descarga y recarga para las probetas prefisuradas y las probetas de acompañamiento.

Las probetas cilíndricas (generalmente 3) se destinarán al ensayo de compresión a 28 días.

El proceso de fabricación y estudio de la recuperación de las características mecánicas debido al sanado de la fisura (SH) se podría resumir de la siguiente forma:

- 1) Dosificación del hormigón (día 0).
- 2) Fabricación del hormigón y de las probetas (día 0).
- 3) Entalla y prefisura a flexión a 3 puntos de las probetas prefisuradas (día 2).
- 4) Inspección visual de la fisura (día 2).
- 5) Introducción en el ambiente de sanado de las probetas prefisuradas y las de acompañamiento (día 2).
- 6) Rotura a compresión de las probetas cilíndricas (día 28).
- 7) Extracción del ambiente de sanado de las probetas prefisuradas y acompañamiento (día 42).
- 8) Inspección visual de la fisura de las probetas prefisuradas (día 42).
- 9) Recarga de las probetas prefisuradas hasta su rotura mediante el ensayo a flexión a 3 puntos (día 42).
- 10) Entalla, fisura, descarga y recarga hasta la rotura completa de las probetas de acompañamiento (día 42).

3.5.1 Metodología del ensayo de flexión a 3 puntos

La máquina usada para este ensayo fue una INSTRON (ver Figura 76 izquierda y derecha). Se obtuvieron gráficas carga-flecha tanto para la carga como para la descarga de las probetas. A través de estas gráficas se pudo obtener la carga pico y la rigidez, pudiendo calcular las recuperaciones de ambas propiedades debidas a la sanación.

Para proceder con el ensayo, a las probetas se les realiza previamente una entalla en el centro de su longitud de una profundidad de 18 mm para garantizar la aparición de una única fisura en el centro del vano, como se puede observar en la Figura 76 izquierda:

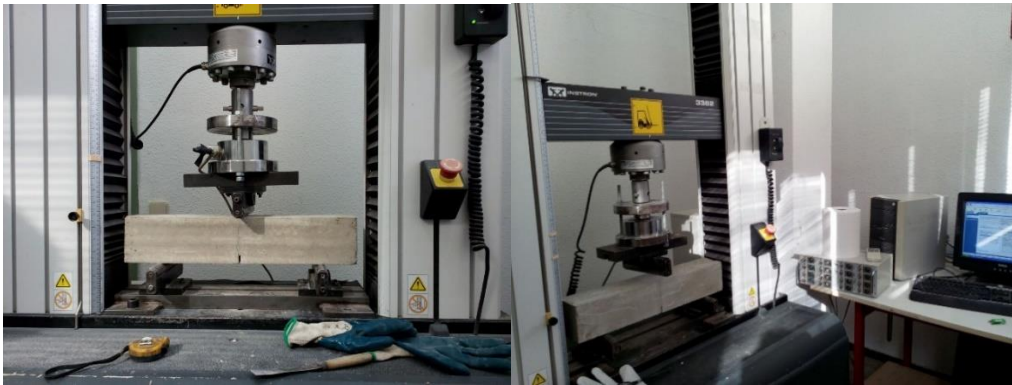


Figura 76. Probeta en carga en la prensa INSTRON.

La colocación de la probeta en la prensa se realiza conforme a la UNE-EN 14651:2005+A1:2007, sin embargo no se coloca ningún captador para medir el desplazamiento que experimenta la probeta al cargarla ya que la finalidad es obtener ciertas aberturas de fisura que, por ser un hormigón con fibras, son fáciles de obtener por comparación con un fisurómetro. Se quiere que las fisuras en reposo tengan una abertura de 0,1 mm y 0,3 mm medido sobre el borde de la entalla, por lo que en carga se abrieron hasta 0,25 y 0,45 mm respectivamente.

Como la carga no debe comenzar a aplicarse hasta que se garantice que los rodillos de apoyo y el rodillo de carga contactan correctamente con la probeta se realiza una precarga de 500 N. La velocidad de carga y descarga de la probeta se mantiene constante durante todo el ensayo y con un valor de 0,03 mm/min.

Para cada ensayo de flexión a tres puntos se procede de la forma descrita previamente, que se puede resumir de la siguiente manera:

- Entalla con profundidad de 18 mm en el centro de la probeta.
- Colocación de la probeta como se especifica en la UNE-EN 14651:2005+A1:2007.
- Precarga de aproximadamente 500N.
- Carga y descarga o carga, descarga y recarga según proceda en función del tipo de probeta (prefisurada o de acompañamiento) pero siempre con una velocidad de carga y descarga constante de 0,03 mm/min. Las aberturas de fisura a obtener son 0,25 y 0,45 mm.

3.5.1.2 Probetas Prefisuradas (2 días)

Para el caso de ensayo de flexión a 3 puntos de las probetas con edades de 2 días se procederá de la forma descrita.

Una vez se llegue en la carga de la probeta a la abertura de fisura deseada, 0,25 ó 0,45 mm (ver Figura 77), se procede a la descarga controlada hasta que la rama de descarga se haga constante.



Figura 77. Comparación de la abertura de fisura con un fisurómetro. Fisura final deseada de 0,3 mm.

Con este ensayo, se obtienen las curvas carga-flecha para la carga y la descarga de la probeta a 2 días. La Figura 78 izquierda y derecha muestra las curvas tipo de carga-descarga para contenidos en fibra de 40 y 70 kg/m³ que se han obtenido en los ensayos:

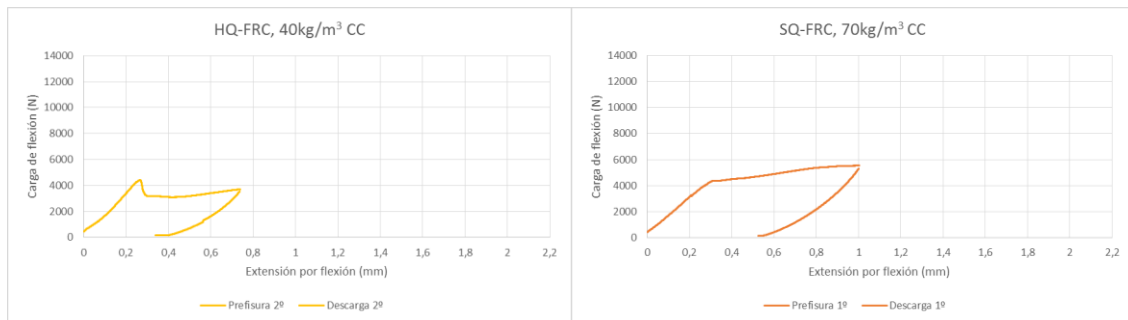


Figura 78. Curvas de carga (Prefisura) y descarga (Descarga) tipo para hormigones con contenidos de 40 (curvas amarillas, izquierda) y 70 kg/m³ en fibras (curvas naranjas, derecha).



Figura 79. Imagen compuesta mediante fotos tomadas con el microscopio de una fisura antes de la introducción en el ambiente de sanado.

3.5.1.3 Probetas recarga (44 días)

Una vez las probetas que se han prefisurado a la edad de 2 días han estado 42 días expuestas al ambiente de sanado se sacan de los tanques de agua y se dejan secar. Con una inspección visual se observa que las fisuras contienen deposiciones blancas tanto en las probetas control (CC) como en las probetas a las que se les ha añadido aditivo cristalino (CCA) (ver Figura 80). Estas deposiciones se espera que sean carbonatos en el caso de las probetas control.



Figura 80. Imagen compuesta (izquierda) y detalle (derecha) mediante fotos tomadas con el microscopio de una fisura después de la introducción en el ambiente de sanado.

El proceso de ensayo es similar al de las probetas prefisuradas antes de la exposición.

La probeta se colocará en la prensa conforme se ha especificado y se procederá a cargarla hasta la rotura completa de la probeta.

En la Figura 81 se puede observar como después de volver a someter a la probeta sanada a la carga, la fisura se ha vuelto a abrir.

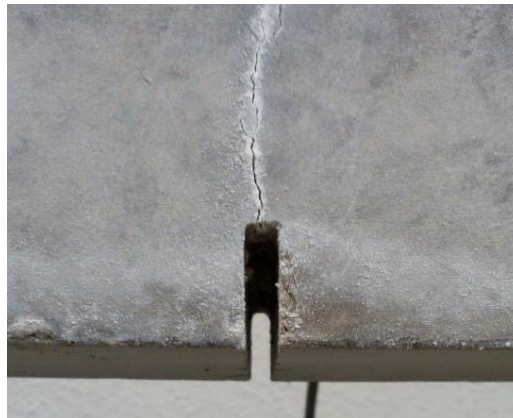


Figura 81. Fisura con deposiciones después del periodo de sanado durante la recarga.

En la Figura 82 se muestran en amarillo una curva tipo de recarga a los 44 días de una probeta con 40kg/m^3 de fibras (izquierda) y otra con 70 kg/m^3 (derecha). Las curvas grises son las curvas de carga y descarga obtenidas al ensayar las probetas a dos días. Se representan las curvas de recarga a 44 días con las curvas de prefisura y descarga a 2 días para una mejor comparación.

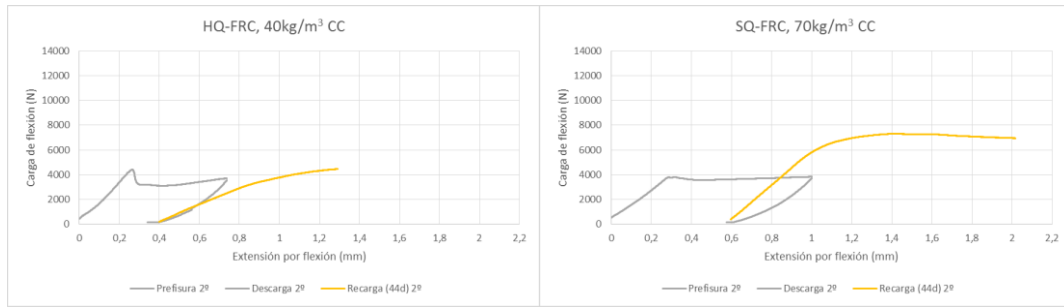


Figura 82. Curvas carga-descarga a dos días (grises) y curva recarga a 44 días (amarillas) para probetas de SQ-FRC con un contenido en fibras de 40 y 70kg/m³. Ambas sin aditivo cristalino.

Las pendientes de la rama recarga a 44 días servirán para calcular la recuperación de la rigidez que han experimentado las probetas.

3.5.1.4 Probetas de acompañamiento (44 días)

Las probetas de acompañamiento se sacarán de la inmersión en agua al mismo tiempo que las probetas prefisuradas, a los 42 días de haberlas introducido y a los 44 días de su fabricación.

Las probetas se entallan y se procede con el ensayo como se procede con las probetas prefisuradas a 2 días. Sin embargo después de la descarga en vez de terminar el ensayo (curvas prefisura y curvas descarga) se esperan 10 minutos a que la probeta se recupere y se vuelve a cargar (recarga). En la Figura 83 se muestra este proceso para una probeta tipo con contenido en fibras de 40 kg/m³ sin aditivo cristalino (naranja) y otra con 70 kg/m³ y aditivo cristalino (azul). Las pendientes de estas curvas de carga y recarga se calcularán para evaluar el sanado de la fisura, conjuntamente con la pendiente de recarga a 44 días de la probeta prefisurada.

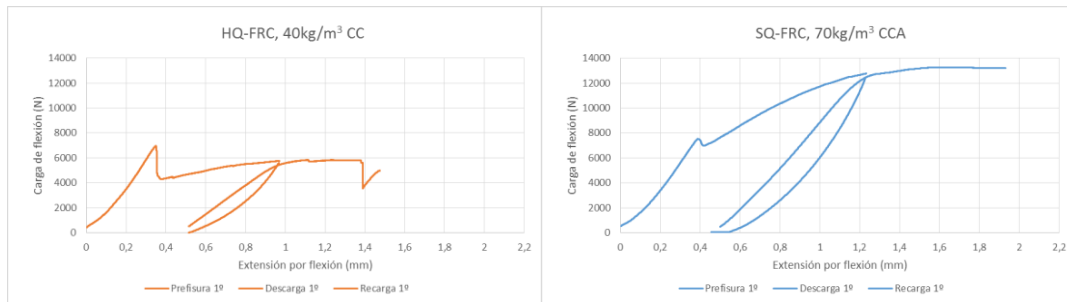


Figura 83. Curvas de carga, descarga y recarga tipo para hormigones con contenido en fibras de 40 kg/m³ (curvas naranjas) y 70 kg/m³ (curvas azules).

3.5.1.5 Inspección visual de la fisura

La inspección visual de la fisura se realiza antes y después de la exposición al ambiente de sanado mediante un microscopio universal PCE-MM200 de 10 a 200 aumentos, con resolución 1280 x 1024 píxeles (ver Figura 84).



Figura 84. Microscopio PCE-MM200 utilizado para las fotografías de las fisuras.

La inspección visual consiste en el barrido de la fisura tomando fotos de forma que haya solape entre la anterior y la posterior para la posterior reconstrucción de la fisura mediante el programa Adobe Photoshop 2014.

Para establecer una escala a la hora de analizar las fisuras se usa un fisurómetro como referencia (ver Figura 85). Con el fin de garantizar la buena calidad de las fotografías de la fisura previamente, y sobre todo en el caso de las fisuras sanadas, se procederá a la limpieza de las zonas adyacentes a la fisura con agua en spray y su secado con papel. Las fotografías de la fisura se toman a 60 aumentos y las de detalle a 200.



Figura 85. Proceso de toma de fotografías con el microscopio.

Esta inspección es un complemento visual al estudio de la eficiencia del sanado mediante el ensayo a flexión a 3 puntos, sirviendo para comparar de una forma visual la evolución de los productos de sanado depositados en la fisura.

3.5.1.6 Introducción al ambiente de sanado

El ambiente de sanado consistirá en la inmersión de las probetas prefisuradas y de acompañamiento durante un periodo de 42 días en agua a 30°C, tanto para las probetas de control (CC) como para las probetas con aditivo cristalino (CCA).

Para evitar interacciones entre las probetas control y las probetas con aditivo cristalino se destinan dos tanques diferentes para cada tipo de probetas, de forma que no estén en contacto con un agua compartida (ver Figura 86).



Figura 86. Ambiente de sanado de las probetas. Tanques con agua a 30°C.

Se comprueba con regularidad que la temperatura del agua es de 30°C mediante un termómetro de mercurio.

3.5.2 Metodología para el cálculo de resultados.

Se explica a continuación la metodología que se ha seguido para el cálculo tanto de la recuperación de la carga pico como de la recuperación de la rigidez.

3.5.2.1 Recuperación de la carga pico

Respecto a la carga pico, como se puede observar en el Anejo generalmente las gráficas de recarga a 44 días no presentan un pico que pudiera representar una recuperación significativa de la resistencia, por lo que no se propone un método para su evaluación.

3.5.2.2 Recuperación de la rigidez

La recuperación de la rigidez se evaluará mediante las pendientes de recarga a 44 días de la probeta prefisura, las pendientes de prefisura a 44 días de las probeta de acompañamiento y las pendientes de recarga a 44 días de las probetas de acompañamiento. Esto se hace siguiendo el método propuesto en el borrador de la CEN/TC como se ha visto en el apartado 2.5.2, sólo que las curvas que se han obtenido en este proyecto se tratan de curvas carga-flecha en vez de carga-abertura de fisura.

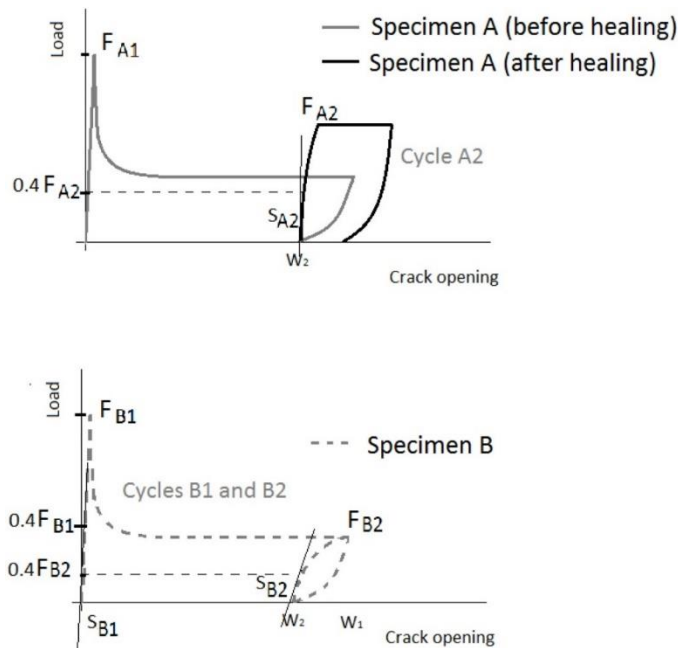


Figura 87. Método de cálculo de las pendientes, [33].

Para el cálculo de las pendientes en este proyecto como la primera parte de las gráficas obtenidas en el ensayo de flexión a tres puntos podría estar influenciada por el asiento y el apoyo de la probeta sobre los rodillos y el apoyo de la célula de carga se ha decidido no coger una zona muy cercana a 0 para evitar que estas alteraciones influyan en el cálculo de la rigidez.

Así mismo, como generalmente no se ha observado ningún pico de carga que pudiera significar la sanación del hormigón al analizar la recuperación de la rigidez para evaluar su sanado es necesario que los valores que se elijan para calcular la pendiente no estén en la zona superior donde lo más probable es que solo estén actuando las fibras y por tanto si hubiera algún cambio como consecuencia del hormigón se pasara por alto. El intervalo elegido tiene que estar formado por una cantidad de puntos adecuada de forma que sea representativo, además se usará el mismo intervalo para los cálculos de las pendientes de todas las probetas del mismo tipo.

Por estos motivos y observando las gráficas obtenidas se ha elegido como intervalo el definido por el 40 y 70% de la carga pico. En el caso de las probetas prefisuradas que se recargan a 44 días la carga pico será la obtenida en el ensayo a flexión a dos días (Pendiente recarga 44 días, ver Figura 88). Para las probetas de acompañamiento, tanto la pendiente de la prefisura como la pendiente de la recarga se calculará con la carga pico de la propia probeta al ensayarla a 44 días (Pendiente acompañamiento prefisura y Pendiente acompañamiento recarga, ver Figura 89).

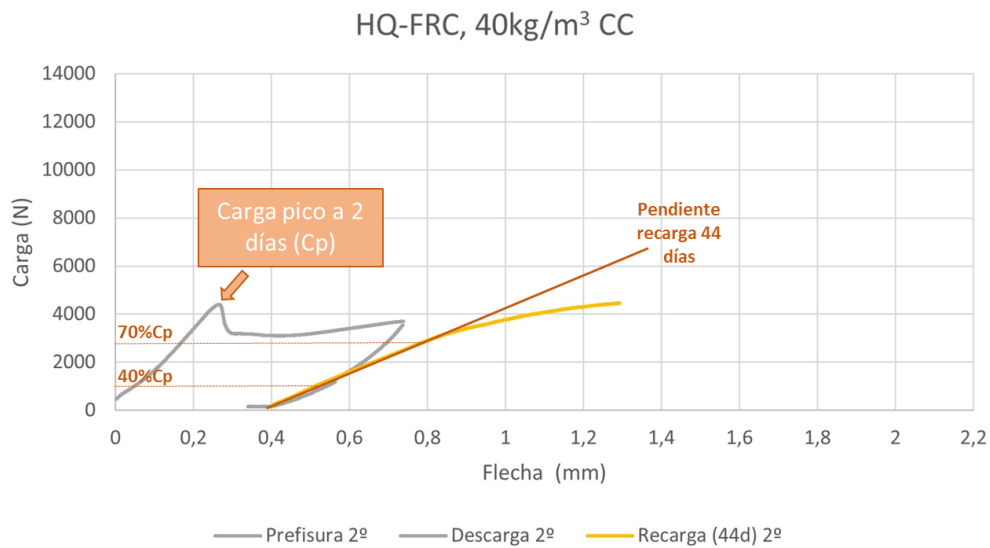


Figura 88. Cálculo pendiente de recarga a 44 días.

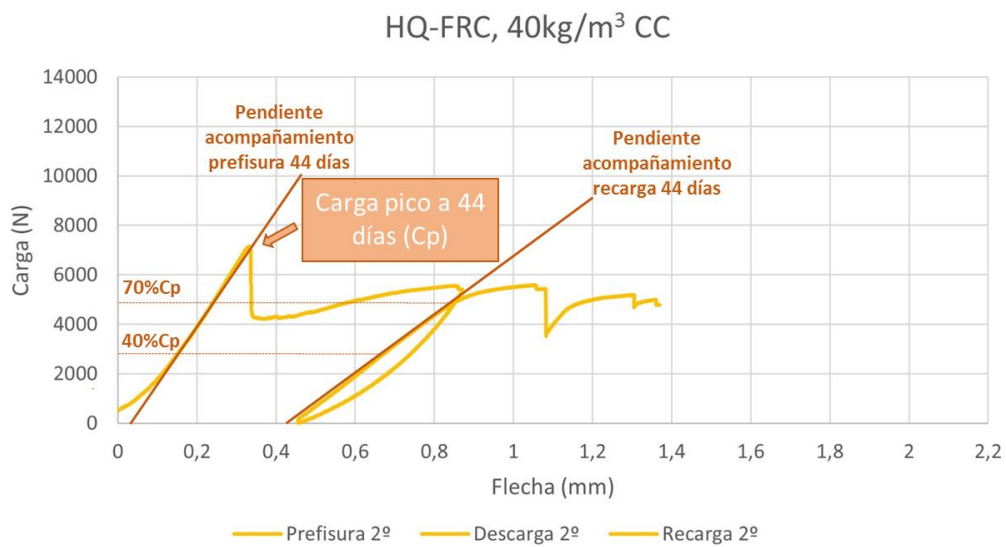


Figura 89. Cálculo de la pendiente de acompañamiento prefisura y de la pendiente de acompañamiento recarga a 44 días.

Para el cálculo analítico de las pendientes se desarrolla un documento Excel de forma que se calcule la carga pico, los intervalos para la pendiente en función de esa carga y finalmente la pendiente de la curva de la forma más automatizada posible (ver Figura 90).

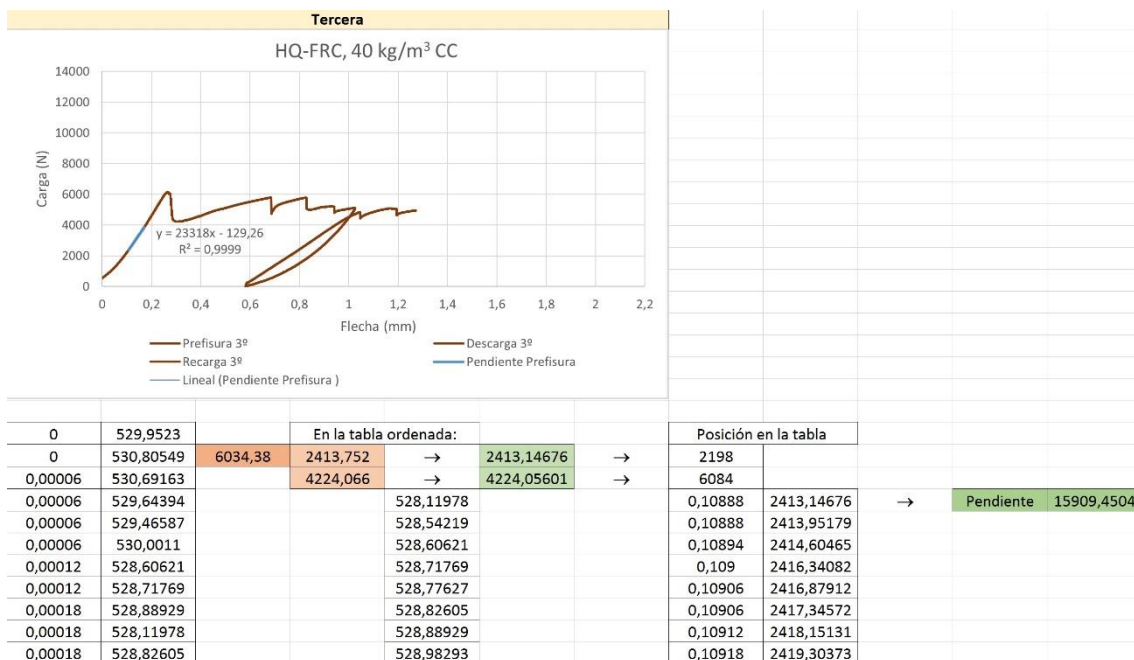


Figura 90. Ejemplo de hoja Excel para el cálculo de las pendientes.

Una vez calculadas las pendientes la recuperación de la rigidez se evaluará de las dos siguientes formas:

- Fórmula del CEN:

$$R_{rigidez} = \frac{P_{recarga(44d)} - P_{acomp,recarga(44d)}}{P_{acomp,prefisura(44d)} - P_{acomp,recarga(44d)}}$$

- Fórmula alternativa:

$$R_{rigidez} = \frac{P_{recarga(44d)}}{P_{acomp,prefisura(44d)}}$$

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1 Resultados de ensayos de caracterización

A continuación se exponen los resultados de los ensayos realizados al hormigón para su caracterización, siendo estos tanto los de control en estado fresco y en estado endurecido (consistencia y resistencia respectivamente) como los ensayos de flexotracción.

4.1.1 Ensayos de consistencia

Los ensayos de consistencia sobre el hormigón en estado fresco se realizan debido a la relación que puede guardar la fluidez de la pasta con la resistencia y otras características del hormigón endurecido. A pesar de que trabajabilidad deseada se corrigió con superplastificante, para garantizar la representatividad de los resultados posteriores se decide llevar a cabo los ensayos de consistencia que se muestran en las siguientes tablas (ver Tabla 10 y Tabla 11):

Sanación (SH)				
Amasada	Tipo	Fecha de amasado	Descenso en el cono (cm)	Diámetro de la torta (cm)
1 (0% C.A)	HQ-FRC, 40	25/01/2016	8	-
2 (0% C.A)	HQ-FRC, 40	01/02/2016	17	-
4 (0% C.A)	HQ-FRC, 70	15/02/2016	10	-
5 (0% C.A)	HQ-FRC, 70	16/02/2016	12	-
6 (0% C.A)	SQ-FRC, 70	22/02/2016	9	-
7 (0% C.A)	UHPFRC, 150	23/02/2016	-	75
11 (0% C.A)	UHPFRC, 40	25/04/2016	-	65
3 (8% C.A)	HQ-FRC, 40	08/02/2016	15	-
9 (8% C.A)	HQ-FRC, 70	18/04/2016	12	-
10 (8% C.A)	SQ-FRC, 70	19/04/2016	10	-
12 (8% C.A)	UHPFRC, 40	26/04/2016	-	80*
13 (8% C.A)	HQ-FRC, 40	03/05/2016	12	-

Tabla 10. Tabla de consistencias para las diferentes amasadas para el estudio de la sanación (SH).

Caracterización				
Amasada	Tipo	Fecha de amasado	Descenso del cono (cm)	Diámetro de la torta (cm)
Acaract ₀	HQ-FRC, 40	15/03/2016	-	-
Acaract ₁	SQ-FRC, 70	06/05/2016	7	-
Acaract ₂	HQ-FRC, 70	06/05/2016	8	-
Acaract ₃	UHPFRC, 40	09/05/2016	-	75

Tabla 11. Tabla de consistencias para las diferentes amasadas de caracterización.

En el valor marcado como (*) se quiere hacer un comentario ya que en esta amasada de muy alto rendimiento al añadir el 8% de aditivo cristalino sobre el peso del cemento, se obtuvo una cantidad de material fino que era excesiva para la relación agua/cemento establecida inicialmente en la dosificación. Por este motivo hubo que añadirle 1,3 kg de agua más a la amasada, pasando a ser la relación agua/cemento de 0,2 a 0,25.

De estos valores cabría destacar que el único que se sale de los límites de consistencia fluida admisibles, incluidas tolerancias, de la UNE es el caso del cono 7 cm en la amasada de caracterización 1 (Acaract₁). Esto es debido a la gran cantidad de fibras por metro cúbico con la que se hizo esta amasada (70 kg/m³). De hecho, generalmente los valores más bajos de descenso de cono se han obtenido para las amasadas de hormigones de calidad estándar con 70 kg/m³ de fibras, siendo el descenso máximo del cono que se ha obtenido con ellas de 12 cm.

En el caso de los hormigones con aditivo cristalino, se observa que no hay valores pequeños. Incluso en la amasada con 70 kg/m³ de fibras el valor del descenso es de 10 cm, que vuelve a ser de nuevo la amasada con menos descenso de cono en este grupo. Hay que añadir que la amasada 3 es la que más descenso del cono experimenta y es la única que se ha realizado con el aditivo cristalino W. En estudios anteriores otros investigadores han observado que el aditivo W fluidificaba el hormigón. Las demás amasadas con aditivo cristalino se realizan con el aditivo X.

Tanto amasadas con descensos del cono que superen los valores máximos establecidos por la normativa como las que no lleguen a los mínimos pueden presentar problemas al endurecerse. En el caso de la amasada que no llega al límite mínimo (Acaract₁) se decidió vibrar las probetas en vez de compactar con la barra compactadora para eliminar posibles problemas derivados de la colocación de un hormigón poco fluido como es la formación de coqueas.

4.1.2 Ensayos de compresión

Los ensayos de compresión se realizan conforme a la UNE-EN 12390 Parte 3 como se ha explicado en el apartado 3.5.2 de este proyecto.

Los resultados obtenidos para las amasadas para el estudio de la sanación se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 12) y se representan en la Figura 91:

Amasada	Tipo	Fecha	28 días		
			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
1 (0% C.A)	HQ-FRC, 40 CC	25/01/2016	54,9	54,6	56
2 (0% C.A)	HQ-FRC, 40 CC	01/02/2016	50,7	53,5	53
4 (0% C.A)	HQ-FRC, 70 CC	15/02/2016	58	56	56,3
5 (0% C.A)	HQ-FRC, 70 CC	16/02/2016	61	60,2	56,8
6 (0% C.A)	SQ-FRC, 70 CC	22/02/2016	33,6	34,7	33,6
7 (0% C.A)	UHPFRC, 150 CC	23/02/2016	155,5	159	155
11 (0% C.A)	UHPFRC, 40 CC	25/04/2016	172,5	169	179
3 (8% C.A)	HQ-FRC, 40 CCA	08/02/2016	56,6	52,1	57,1
9 (8% C.A)	HQ-FRC, 70 CCA	18/04/2016	56,3	58,5	59,3
10 (8% C.A)	SQ-FRC, 70 CCA	19/04/2016	39,9	38,5	38
12 (8% C.A)	UHPFRC, 40 CCA	26/04/2016	125	123,5	-
13 (8% C.A)	HQ-FRC, 40 CCA	03/05/2016	60,7	57,7	58,2

Tabla 12. Resultados de compresión a 28 días para amasadas de estudio de la sanación (SH).

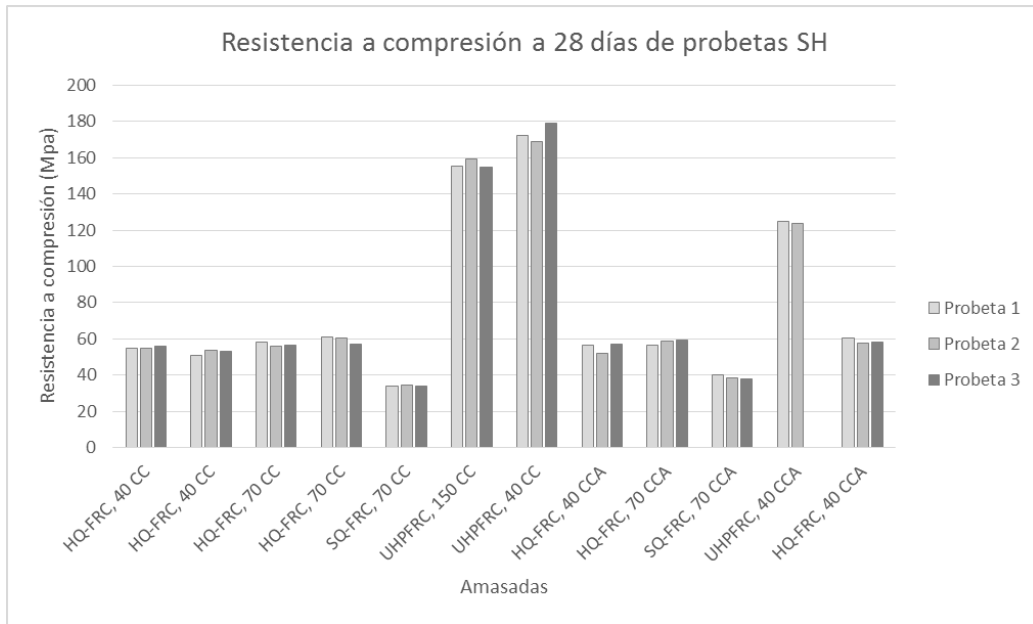


Figura 91. Resistencia a compresión a 28 días por tipo de hormigón y para cada probeta para las amasadas de SH.

Los resultados obtenidos para las amasadas de caracterización se representan en la Tabla 13 y se comparan en la

Amasada	Tipo	Fecha	28 días		
			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Acaract ₀	HQ-FRC, 40	15/03/2016	36,9 [!]	54,4	52,4
Acaract ₁	SQ-FRC, 70	06/05/2016	39,7	40,8	40,4
Acaract ₂	HQ-FRC, 70	06/05/2016	51,6	52,1	52,7
Acaract ₃	UHPFRC, 40	09/05/2016	152,5	160	152,5

Tabla 13. Resultados de los ensayos de compresión para las amasadas de caracterización.

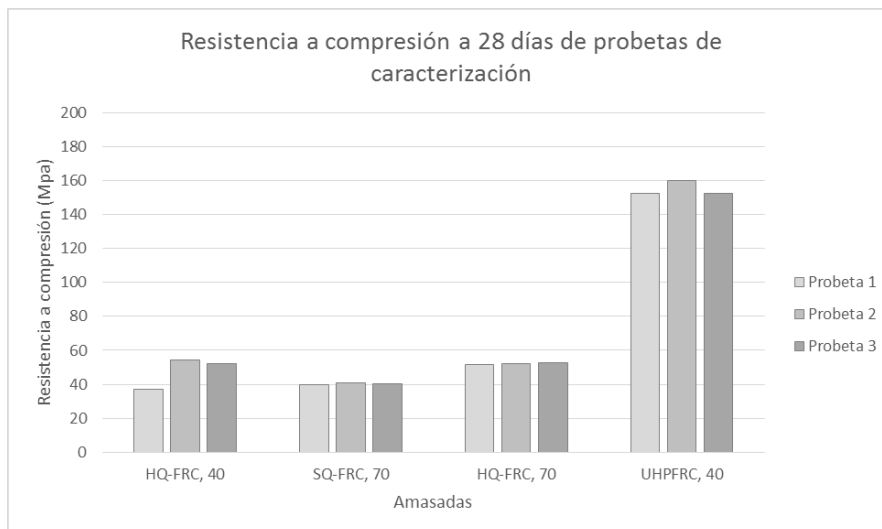


Figura 92. Gráfica que muestra la resistencia por tipo de hormigón y por probeta para las amasadas de caracterización.

En la tabla, el primer valor de resistencia de la amasada Acaract₀ está indicado con (!). Esto se debe a que se detectó que la probeta tenía desviaciones en el paralelismo de las caras, por lo que

la resistencia a compresión de la probeta se ha visto afectada, como se observa en la gráfica. Por ello no es un valor representativo de la resistencia a compresión de esa amasada.

Además de los ensayos a compresión a 28 de las amasadas para SH y de caracterización, se realizaron ensayos de compresión a 2 y 7 días debido a la obtención de resistencias bajas en los ensayos de flexión de probetas con aditivo (Anejo 1) que plantearon estudiar la evolución de la adquisición de resistencia de las amasadas con aditivo (ver Tabla 14).

Amasada	Tipo	Fecha	2 días			7 días		
			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
7 (0% C.A)	UHPFRC, 150	23/02/2016	95	99,5	100,5	127,5	130	126,5
11 (0% C.A)	UHPFRC, 40	25/04/2016	111	-	-	-	-	-
12 (8% C.A)	UHPFRC, 40	26/04/2016	0	-	-	-	82	-
Acaract ₀	HQ-FRC, 40	15/03/2016	27,2	28,3	27,7	41,6	42,4	38,8
Acaract ₃	UHPFRC, 40	09/05/2016	86,5	92,5	93,5	116,5	118	-

Tabla 14. Resultados de resistencia a compresión a 2 y 7 días de las amasadas seleccionadas.

En la Figura 93 se muestra la evolución de la resistencia a 2, 7 y 28 días según los resultados obtenidos:

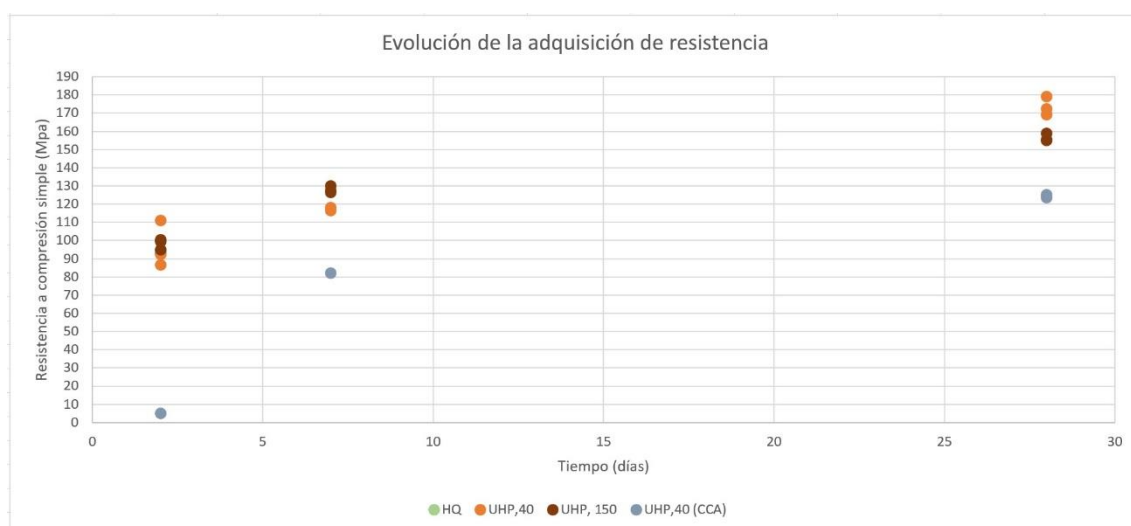


Figura 93. Gráfica de la evolución de la resistencia a 2, 7 y 28 días para las amasadas seleccionadas.

El estudio de la adquisición de resistencia se debe a que la primera amasada que se realizó con aditivo cristalino W (amasada 3) al ensayarla a flexión a 2 días dio una resistencia del orden de un 70% menor que las que se observaron en sus compañeras sin aditivo. Es por ello por lo que se decidió hacer un estudio de la evolución de la resistencia en las probetas con aditivo cristalino W en las siguientes amasadas. En la siguiente amasada de control (Acaract₀) se incluyeron 6 probetas cilíndricas más para romper a 2 y a 7 días y poder comparar la adquisición de resistencia de una probeta con aditivo y sin. Sin embargo, no fue posible hacer lo mismo para la siguiente amasada de hormigón con aditivo cristalino (programada dos meses después) porque esta experimentó un fraguado acelerado (ver Figura 94). Es la amasada A8 que no aparece en ninguna gráfica ni tabla porque fue una amasada fallida.



Figura 94. Probeta con fraguado acelerado de la amasada A8.

Como se puede observar, ni si quiera dio tiempo para acabar de colocar el hormigón en las probetas. La tercera capa no se pudo compactar con la barra compactadora debido a que endureció como si tuviera 2 días en apenas media hora.

Después de estudiar lo que había sucedido mediante la fabricación de morteros auxiliares se llegó a la conclusión de que el fraguado acelerado tenía su causa en el aditivo cristalino W, por lo que se decidió cambiar al aditivo cristalino X.

Las probetas con este nuevo aditivo cristalino generalmente no han visto reducida la resistencia a compresión por lo que no se continuó fabricando probetas de control de resistencia para 2 y 7 días. Sin embargo, el hormigón de muy alto rendimiento fabricado con el aditivo cristalino (amasada 12) presentó un retraso de fraguado muy importante, siendo que a dos días no tenía apenas resistencia a compresión, mientras que las probetas de misma dosificación pero sin aditivo a 3 días tenían resistencias del orden de 111 Mpa (ver Figura 95 izquierda y derecha).



Figura 95. Probeta cúbica de UHPFRC CCA a 2 días con retraso de fraguado (izquierda) y comparación entre la probeta con retraso de fraguado y una probeta de las mismas características sin Aditivo Cristalino. Edad de las probetas 2 y 3 días respectivamente (derecha).

Esta carencia de resistencia es más obvia a los 2 días. Sin embargo, a los 28 días sigue estando por debajo de la media de las demás amasadas con la misma dosificación (gráfica blablá). Parece lógico pensar que una bajada de resistencia tan grande a corto plazo se debe al uso del aditivo, mientras que el hecho de que a 28 días presente menos resistencia de la esperada puede ser consecuencia del aumento de la relación agua/cemento como se ha comentado en el apartado 4.1.1 de este trabajo.

4.1.3 Ensayo de caracterización de los hormigones con fibras a flexotracción

Se exponen a continuación una gráfica tipo de cada hormigón caracterizado: HQ-FRC con 40 kg/m³ de fibras, SQ-FRC con 70 kg/m³, HQ-FRC con 70 kg/m³ y UHPFRC con 40 kg/m³ (ver Figura 96, Figura 97, Figura 98 y Figura 99).

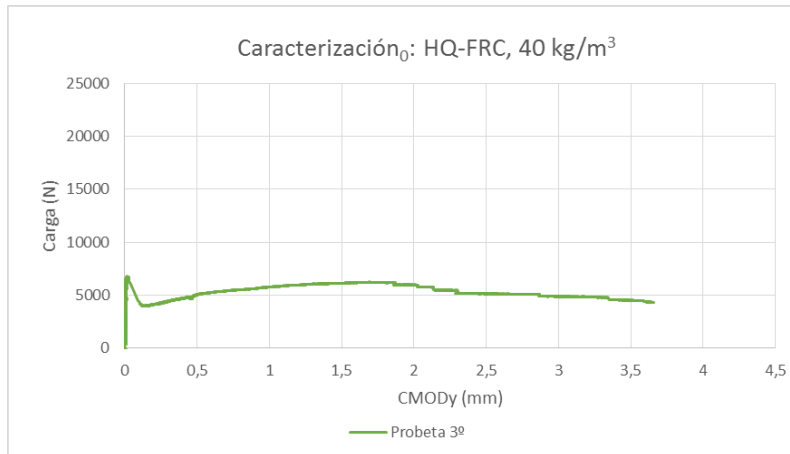


Figura 96. Gráfico CMODy-Carga para HQ-FRC con un contenido en fibras de 40 kg/m³.

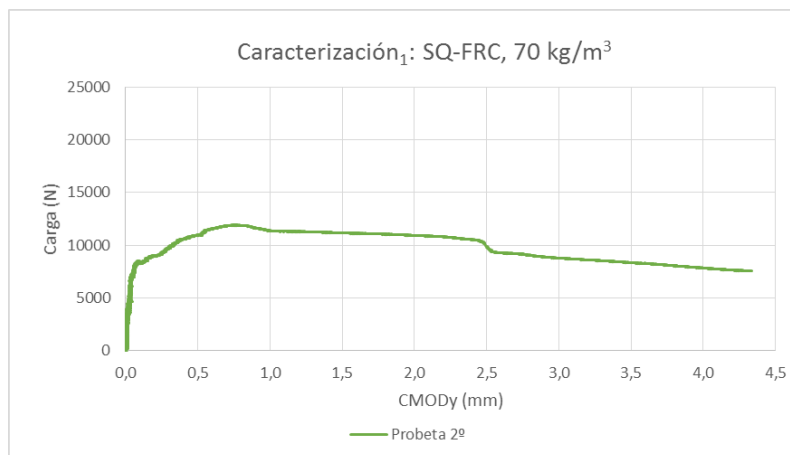


Figura 97. Gráfico CMODy-Carga para SQ-FRC con un contenido en fibras de 70 kg/m³.

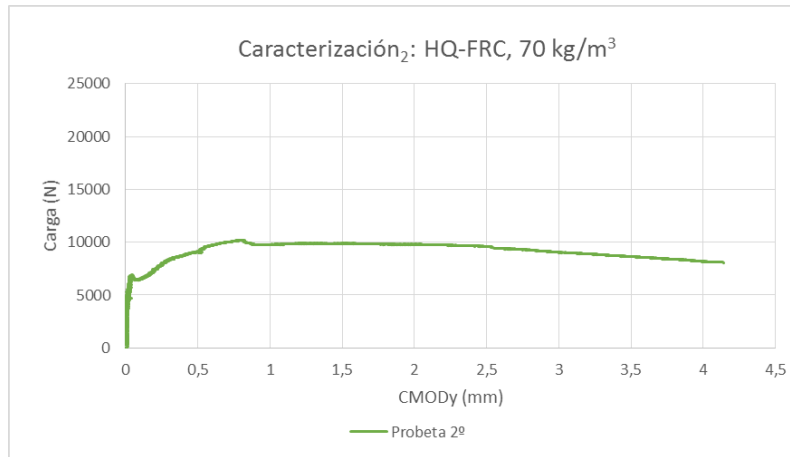


Figura 98. Gráfico CMODy-Carga para HQ-FRC con un contenido en fibras de 70 kg/m³.

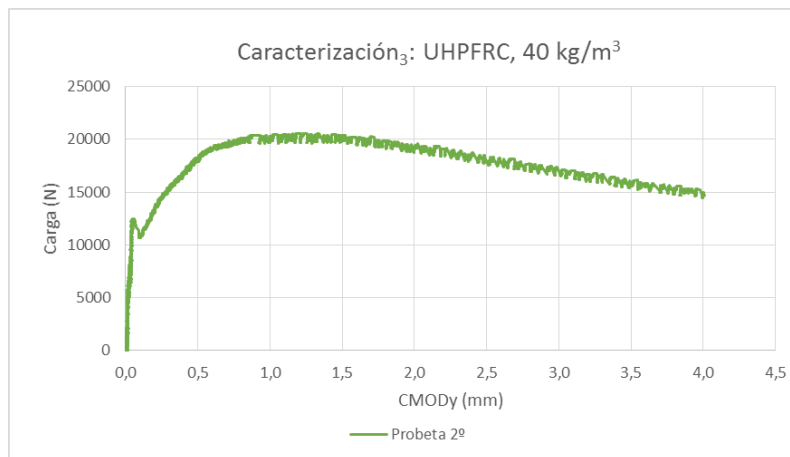


Figura 99. Gráfico CMODy-Carga para UHPFRC con un contenido en fibras de 40 kg/m³.

En el caso del hormigón de muy alto rendimiento el tipo de fibras es diferentes a las fibras utilizadas en el resto de hormigones, causando diferencias en el comportamiento.

Los resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones fabricados han sido los siguientes (ver Tabla 15):

Amasada	Tipo	Fecha de amasado	Probeta	f ₁	f ₃
Acaract ₀	HQ-FRC, 40	15/03/2016	1º	-	-
			2º	3,47	3,31
			3º	3,94	4,00
Acaract ₁	SQ-FRC, 70	06/05/2016	1º	3,69	4,56
			2º	8,93	6,99
			3º	-	-
Acaract ₂	HQ-FRC, 70	06/05/2016	1º	6,57	6,61
			2º	7,51	7,18
			3º	8,05	7,26
Acaract ₃	UHPFRC, 40	09/05/2016	1º	14,73	13,35
			2º	14,80	13,75
			3º	-	-

Tabla 15. Tabla resumen de la caracterización de los hormigones fabricados.

4.1.4 Conclusiones

Como conclusiones de los ensayos vistos en este apartado se podría decir lo siguiente:

- No parece que las fibras afecten a la resistencia a compresión de las probetas.
- Las probetas con aditivo cristalino W presentaban una baja resistencia a flexión a edades tempranas (2 días). (gráfico blablá pag bla)
- Dos meses después de su primera utilización, el aditivo cristalino W provocó un fraguado acelerado en la amasada por lo que se cambió al aditivo cristalino X.
- El aditivo X no parece afectar a la resistencia a compresión en los hormigones de calidad estándar y alta calidad.
- El aditivo X parece afectar al fraguado retardándolo en el caso de hormigones de muy alto rendimiento, pero hay que destacar que su contenido en kg/m^3 es superior a los demás tipos de hormigones fabricados.
- El uso de superplastificante parece no afectar a la resistencia de las probetas.
- Se ha realizado la caracterización de los hormigones fabricados, obteniendo comportamientos claros de endurecimiento a flexión en el caso de cantidades de fibra de 70 kg/m^3 para SQ-FRC y HQ-FRC y en el límite entre endurecimiento y ablandamiento en el caso de 40 kg/m^3 para SQ-FRC y HQ-FRC. Sin embargo, la adición de 40 kg/m^3 de fibras de alto límite elástico en el hormigón de muy alto rendimiento han servido para obtener grandes resistencias residuales.

4.2 Resultados de los ensayos para la evaluación de la sanación (SH)

En este apartado se exponen los resultados de los ensayos a tres puntos para la evaluación de la recuperación de las propiedades mecánicas: carga pico y rigidez.

Las gráficas carga-flecha de todas las probetas ensayadas se encuentran en el Anejo, ordenadas en series según el tipo de hormigón, la cantidad de fibras y la abertura de fisura y clasificadas según los diferentes tipos de probetas (Prefisura a 2 días, Prefisura a 44 días y Acompañamiento a 44 días). Las gráficas con colores azul (claro y oscuro) y verde son las gráficas de las amasadas con aditivo cristalino (CCA), mientras que las naranjas (claro y oscuro) y amarillas son las de hormigón control (CC).

Los datos de los ensayos a 44 días del hormigón HQ-FRC con cantidad de fibras de 40 kg/m³ y aditivo cristalino X no están disponibles en el anejo debido a que todavía no se han ensayado porque se fabricaron el martes 3 de Mayo, por lo que el ensayo a 44 días está programado para el jueves 16 de Junio. Se espera que estos datos se tengan para la defensa del trabajo.

Las probetas de hormigón UHPFRC con contenido en fibras de 40 kg/m³ y con aditivo cristalino X no se incluyen en el anejo ni en el cálculo debido a que se ensayaron e introdujeron en el ambiente de sanado a los 7 días de la fabricación debido al problema de retraso de fraguado, por lo que los resultados obtenidos para esas probetas no son comparables con el resto del programa experimental.

4.2.1 Resultados para la carga pico

Como se ha mencionado en el apartado 3.5.2.1 y se puede observar en el Anejo generalmente las gráficas de recarga a 44 días no presentan un pico que pudiera representar una recuperación significativa de la resistencia. Sin embargo, se ha observado que la tercera probeta de la serie de hormigón de alta calidad con un contenido en fibras de 40 kg/m³, abertura de fisura de 0,1 mm y sin aditivo cristalino presenta un pequeño pico al recargarla después del periodo de sanado (ver Figura 100).

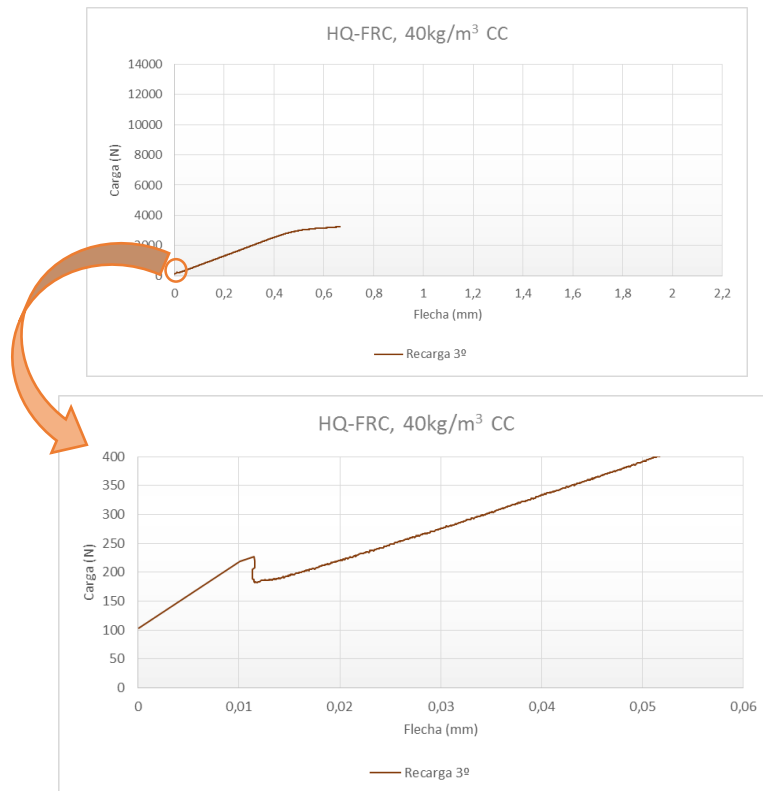


Figura 100. Imagen de la gráfica original (arriba) y de la ampliada aproximadamente 35 veces para la visualización del pico de carga (abajo).

Como se puede observar el pico de carga aparece entre los 200 y 250 N y la pendiente antes de la aparición del pico es significativamente mayor que después. Esto se puede deber a la acumulación de precipitados en la fisura de forma que han aportado rigidez y resistencia, sanándola. Esto confirmaría la posibilidad de que el hormigón genere una sanción debido a la deposición de cristales en las fisuras. Sin embargo las probetas de esa serie a 44 días presentan unas cargas pico de aproximadamente 7000 N, situando la recuperación de la carga pico en un 2,8%. Además, esta recuperación solo es observable en esta probeta, hecho que puede deberse a que los valores en los que se ha apreciado la recuperación (200 y 250 N) son inferiores a los valores de las precargas que se realizan normalmente para iniciar el ensayo, significando que se necesitan métodos más precisos para la detección de este fenómeno.

En esta situación habría que hacer una valoración entre invertir en métodos de investigación con mayor precisión de forma que se pueda detectar estos indicios de sanación o si los resultados que se van a obtener no van a ser suficientemente satisfactorios como para justificar la inversión. En este caso habría que plantearse la investigación en la mejora de los productos de forma que la sanación sea evidente y pueda aplicarse en la obra.

4.2.2 Resultados del cálculo de pendientes

En el Anejo 1 se encuentran todas las gráficas de las probetas ensayadas. En este apartado los resultados que se exponen se corresponden a una probeta que se ha seleccionado como representativa de los diferentes grupos. Las tres gráficas que se muestran por cada grupo son: la primera a la izquierda se trata de la probeta prefisurada a 2 días, la segunda a la derecha se trata

de la probeta prefisurada recargada a los 44 días, la tercera gráfica (abajo) es la probeta de acompañamiento.

Para cada grupo se añade una tabla con los valores calculados de las pendientes de las probetas prefisuradas a 44 días y los de las pendientes de las probetas de acompañamiento para la prefisura y para la recarga, pendientes que servirán para el cálculo de la recuperación de la rigidez de las probetas.

4.2.2.1 Resultados SQ-FRC

Los hormigones de calidad estándar en este trabajo solo se hicieron con una cantidad de fibras de 70 kg/m³ y se llegó a una abertura de fisura de 0,1 mm.

- Probetas control (CC):

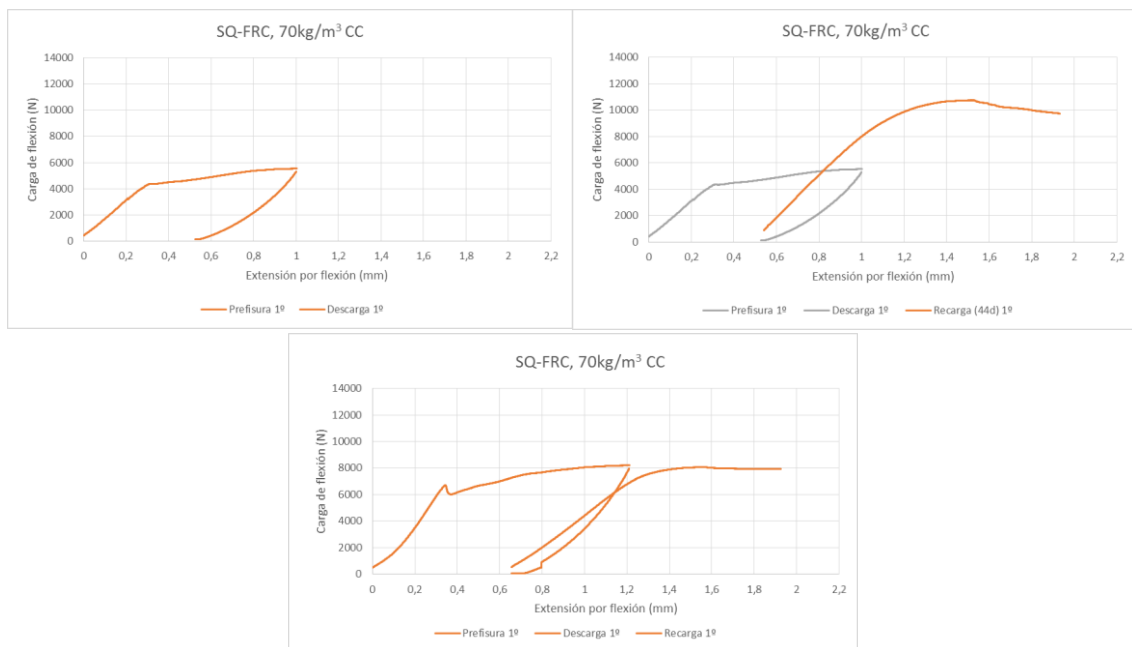


Figura 101. Gráficas SQ-FRC CC, 70 kg/m³ de fibras para abertura de fisura de 0,1 mm.

Las probetas prefisuradas de esta serie llegan a una carga pico a dos días de aproximadamente 4000 N, mientras que a 44 días las probetas de acompañamiento alcanzan aproximadamente los 7000 N. Se observa un comportamiento de endurecimiento a flexión debido a la gran cantidad de fibras por metro cúbico que contienen las probetas. El comportamiento de mayor o menor endurecimiento a flexión dependerá de la cantidad de fibras que atraviesen la fisura.

Las pendientes calculadas para cada probeta de la serie SQ-FRC, 70kg/m³ y sin aditivo cristalino son las mostradas en la [tabla blablá](#). Para estas probetas, las pendientes de recarga a 44 días de las probetas prefisuradas son mayores que las de recarga de acompañamiento, pudiendo significar un sanado de la fisura.

Pendientes recarga (44d)				Pendientes acompañamiento (44d)					
Recarga				Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
SQ-FRC, 70 CC	16318,1903	13906,5987	12754,2153	21881,86	17591,654	-	12196,8	12062,6643	-

Tabla 16. Pendientes de SQ-FRC CC, 70kg/m³ de fibras y abertura de fisura 0,1 mm.

- Probetas con aditivo X (CCA):

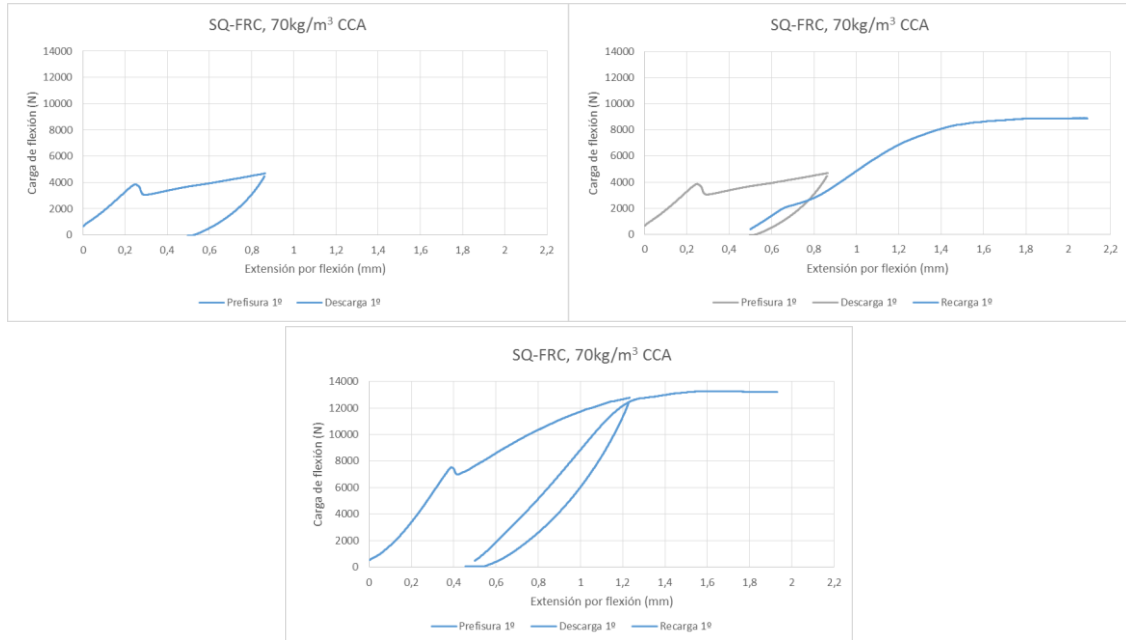


Figura 102. Gráficas SQ-FRC CCA X, 70 kg/m³ de fibras para abertura de fisura de 0,1 mm.

Las probetas de esta serie llegan a una carga pico alrededor de 4000 N. Aunque parece un poco menor que en la misma serie sin aditivo la reducción de carga pico no es remarcable. Al igual que en la misma serie pero sin aditivo se observa un comportamiento de endurecimiento a flexión a causa de la gran cantidad de fibras.

En esta serie, las probetas prefisuradas al recargarse a los 44 días (imagen arriba derecha) presentan un pequeño cambio en la curva que no presentan las probetas de igual dosificación pero sin aditivo. Para analizar este cambio se calculan las pendientes antes y después del cambio para comprobar si hay alguna variación.

Las pendientes calculadas para cada probeta de la serie SQ-FRC, 70kg/m³ y con aditivo cristalino son (ver Tabla 17):

Pendientes recarga (44d)				Pendientes acompañamiento (44d)					
Recarga				Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
SQ-FRC, 70 CCA	10558,227	9609,85	8392,446	21282,21	17744,15	18456,293	16601,67	14866	16622,96
SQ-FRC, 70 CCA	10767,1617	8459,61	8909,67						

Tabla 17. Pendientes calculadas para SQ-FRC CCA X, 70 kg/m³ de fibras para abertura de fisura de 0,1 mm.

En la tabla se ven los valores de que toma la pendiente de recarga a 44 días antes y después del cambio en la gráfica. La variación no parece significativa.

4.2.2.2 Resultados HQ-FRC

Las amasadas de alta calidad se hicieron para 40 y 70 kg/m³ de fibras y para aberturas de fisura de 0,1 y 0,3.

4.2.2.2.1 Abertura de fisura de 0,1 mm

- 40 kg/m³ de fibras
 - Sin aditivo cristalino (CC)

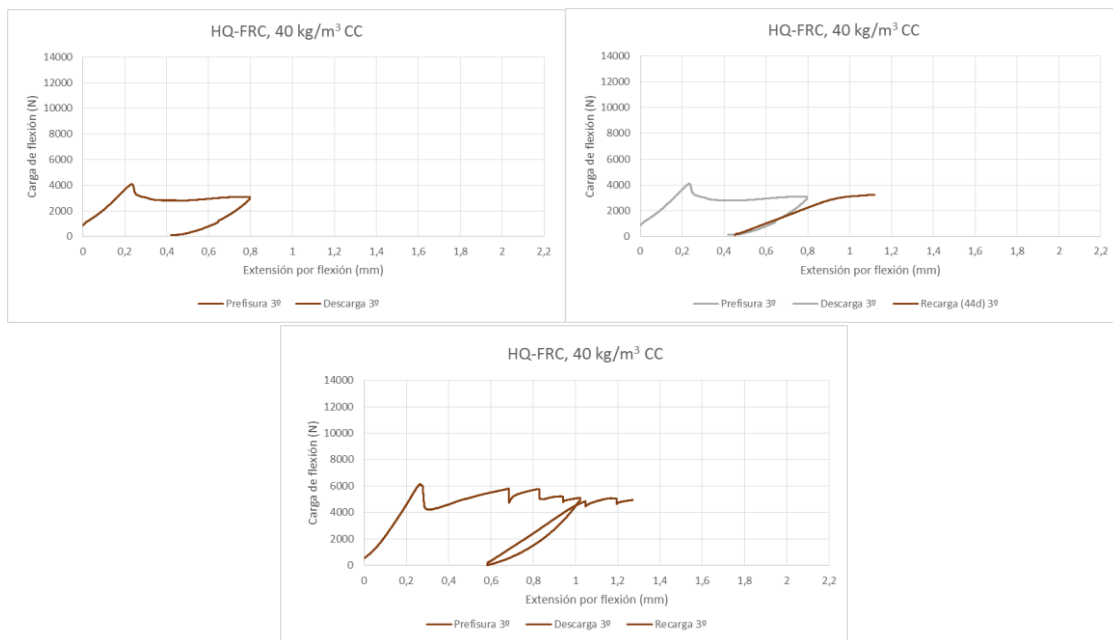


Figura 103. Gráficas HQ-FRC CC, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

Las probetas de esta serie llegan a una carga pico alrededor de 4000 N durante la prefisura a dos días y a 6000 N aproximadamente cuando se ensayan las probetas de acompañamiento. Se observa un comportamiento límite entre endurecimiento y ablandamiento a flexión.

Amasada	Pendientes recarga (44d)			Pendientes acompañamiento (44d)					
	Recarga			Prefisura			Recarga		
	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 40 CC	8352,8248	6476,88	6245,38	23284,3	21407,29	15909,45	11169,84	11934,95	10847,98

Tabla 18. Pendientes calculadas para HQ-FRC CC, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

- Con aditivo cristalino W (CCA)

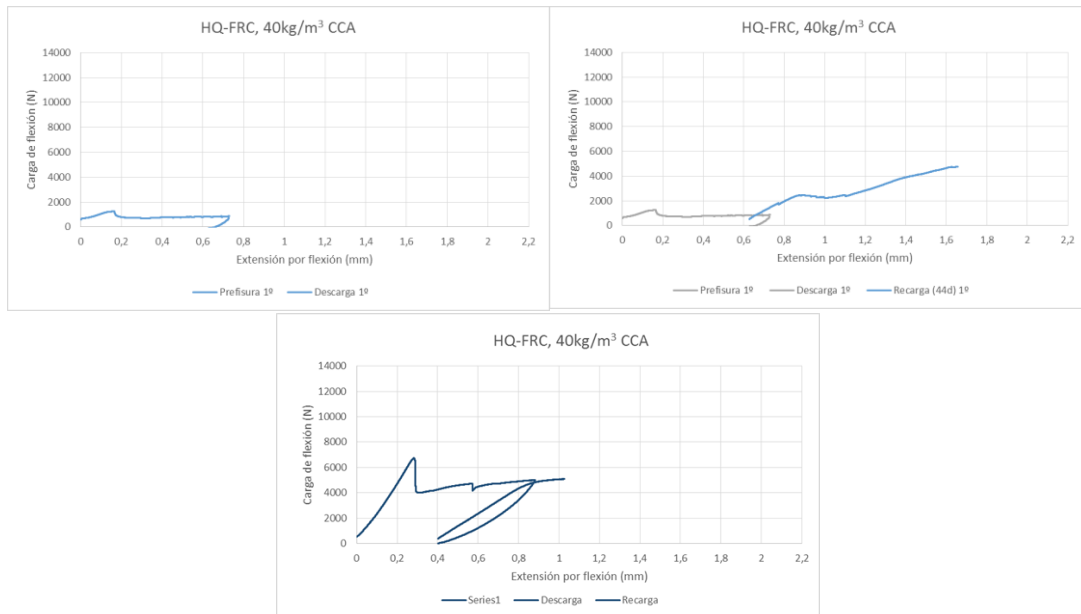


Figura 104. Gráficas HQ-FRC CCA w, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

Para esta amasada las probetas experimentaron un retraso de fraguado, llegando a dos días apenas a una carga de 1500 N. A los 44 días las probetas mostraron una resistencia correcta comparándola con la carga a la que llegan las demás probetas de hormigón de calidad alta y 40kg/m³ de cantidad de fibras.

Además, las curvas de prefisura a 44 días presentan también el cambio en la curva que se ha observado en las probetas de SQ-FRC, 70kg/m³ y con aditivo cristalino, por lo que se procede a calcular la pendiente antes y después de la variación del comportamiento (ver Figura 105). Como a dos días presenta un retraso de fraguado importante a efectos de cálculo se considera la carga pico como 4000 N, valor que alcanzan a dos días las probetas de SQ-FRC, 70kg/m³ y sin aditivo cristalino que se han visto anteriormente.

Para la primera probeta los intervalos del 40 y 70% de la carga pico caían fuera de la zona de interés por lo que se calcula la pendiente con los valores entre 1000 y 2000 N (Figura 105, arriba izquierda). Para el caso de las probetas 2 y 3 la pendiente se calcula con los intervalos establecidos de la carga pico.

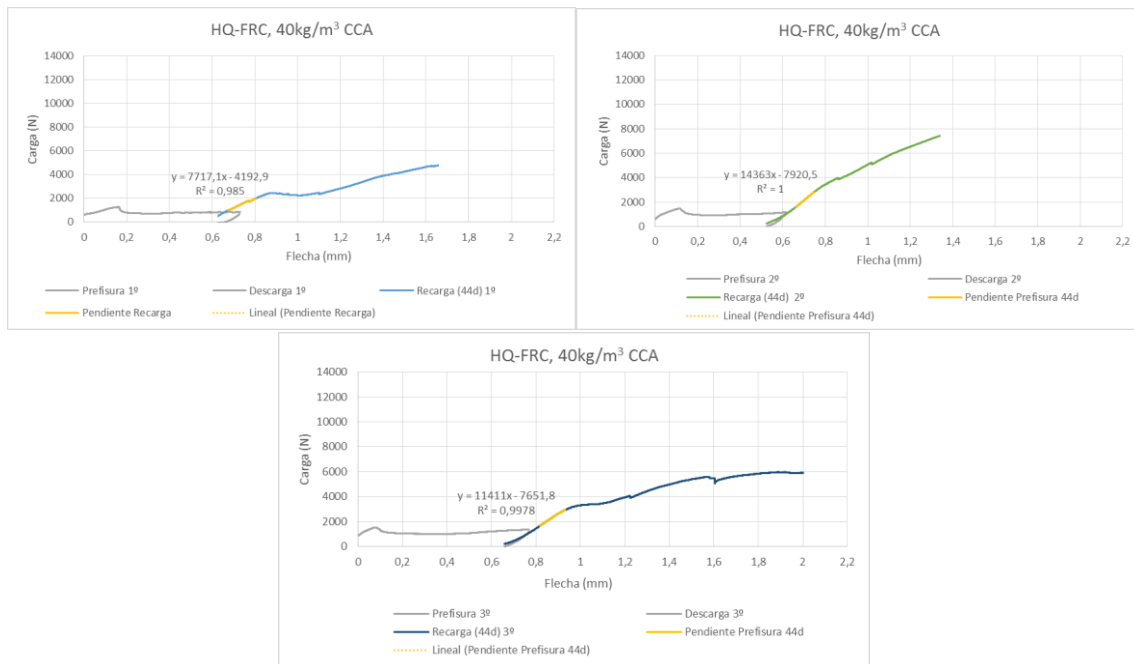


Figura 105. Pendientes de recarga a 44 días de las probetas prefisuradas.

Como en las imágenes se observa que la pendiente más pronunciada es la primera y además en la Figura 105 (arriba derecha y abajo) la zona de interés está dentro de los valores establecidos no se calcula la pendiente de recarga a 44 días después de la variación de la curva.

Las pendientes obtenidas son las siguientes (ver Tabla 19):

	Pendientes recarga (44d)			Pendientes acompañamiento (44d)					
	Recarga			Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 40 CCA	7717,14589	14363,1797	11411,3531	21887,4914	23681,971	23806,9272	14376,7197	12686,35009	9763,6229

Tabla 19. Pendientes calculadas para HQ-FRC CCA w, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

- Con aditivo cristalino X (CCA)

Los ensayos a 44 días de estas probetas no se han podido realizar aún ya que se fabricaron el martes 3 de Mayo. Los ensayos están programados para el jueves 16 de junio y se espera que se puedan incluir en los datos para la defensa del trabajo.

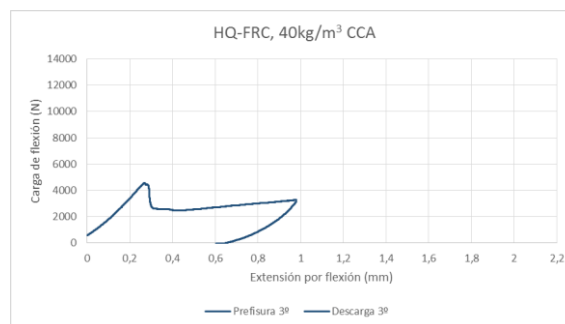


Figura 106. Curva carga-descarga de HQ-FRC CCA x, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

- 70 kg/m³ de fibras

- Sin aditivo cristalino (CC)

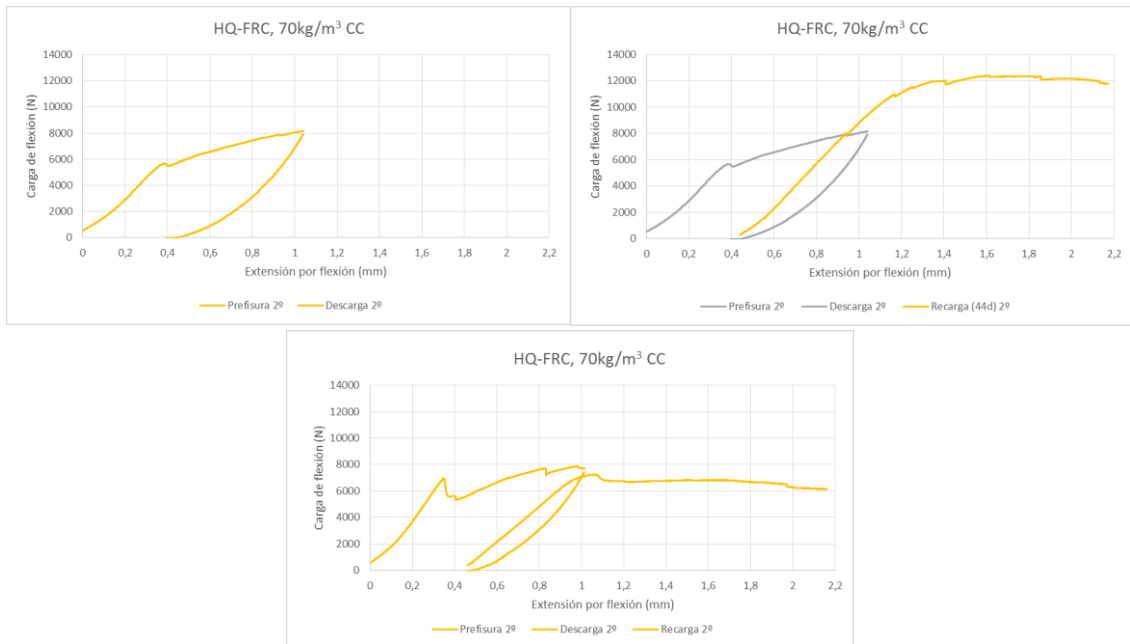


Figura 107. Gráficas HQ-FRC CC, 70 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

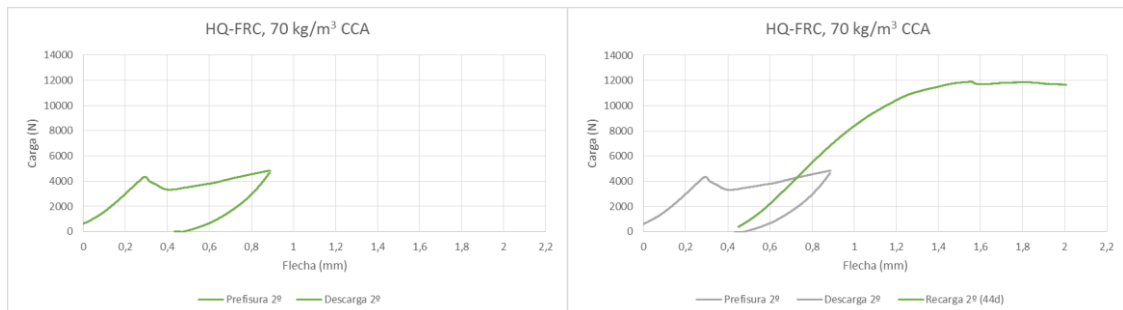
Las probetas a dos días alcanzan valores alrededor de 6000 N, mientras que a 44 días superan los 7000 N. Se observa un comportamiento claro de endurecimiento a flexión.

Los valores calculados de las pendientes son los siguientes (ver Tabla 20):

	Pendientes recarga (44d)			Pendientes acompañamiento (44d)					
	Recarga			Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 70 CC	17031,17	9078,09	10576,98	-	21522,58	22743,98	-	13413,8	16288,93

Tabla 20. Pendientes calculadas para HQ-FRC CC, 70 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

- Con aditivo cristalino X (CCA)



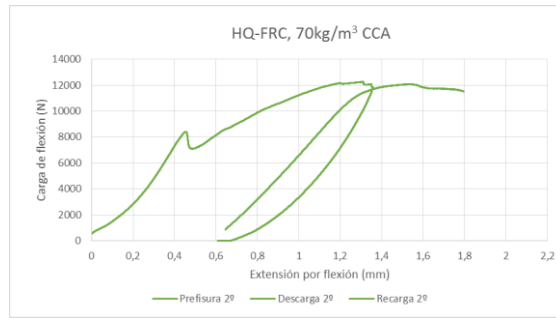


Figura 108. Gráficas HQ-FRC CCA X, 70 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

Las probetas de esta serie llegan a una carga pico alrededor de 4000 N durante la prefisura a dos días y a 8000 N aproximadamente cuando se ensayan las probetas de acompañamiento. Se observa un comportamiento de endurecimiento a flexión.

Las pendientes para el cálculo posterior de la sanación son (ver Tabla 21):

Pendientes recarga (44d)				Pendientes acompañamiento (44d)					
Recarga				Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 70 CCA	11160,3224	15555,3398	14989,3406	18236,37	22108,0123	18702,89	16815,25	16537,46	16554,43

Tabla 21. Pendientes calculadas para HQ-FRC CCA X, 70 kg/m³ y abertura de fisura de 0,1 mm.

4.2.2.2.2 Abertura de fisura de 0,3 mm

Para abertura de fisura de 0,3 mm los hormigones fabricados son 2 y ambos sin aditivo cristalino: HQ-FRC con una cantidad de fibras de 40 kg/m³ y otro HQ-FRC pero con 70 kg/m³.

- 40 kg/m³ de fibras

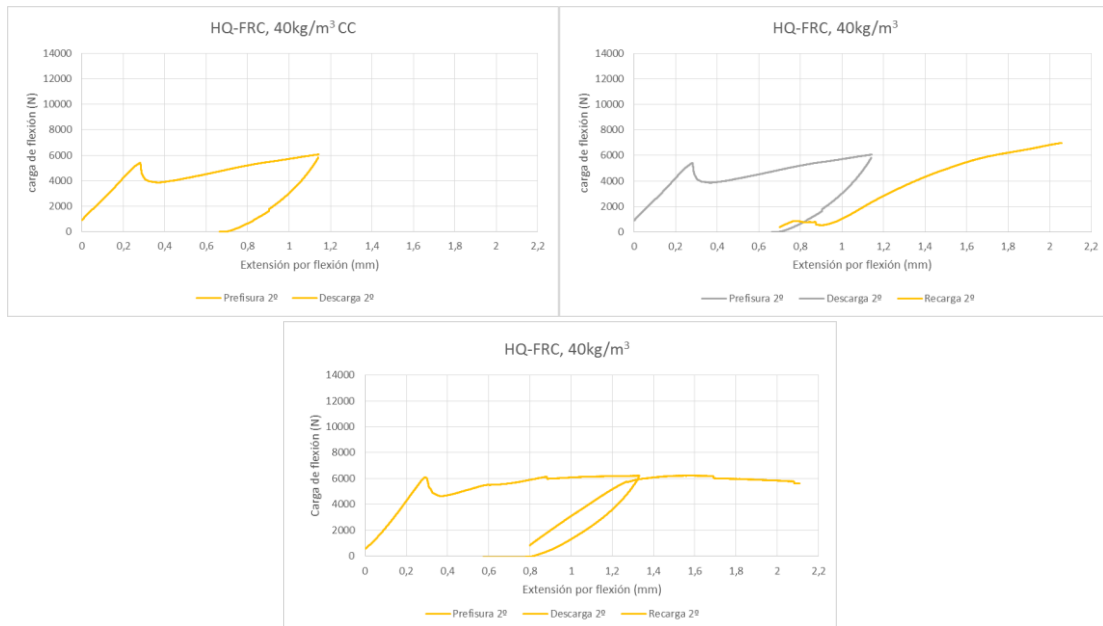


Figura 109. Gráficas HQ-FRC CC, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,3 mm.

Las probetas de esta serie llegan a una carga pico alrededor de 4000 N durante la prefisura a dos días y a 6000 N aproximadamente cuando se ensayan las probetas de acompañamiento.

Como se ha observado un cambio de pendiente en la segunda probeta prefisurada (ver Figura 110) y recargada a los 44 días se estudian ambas pendientes pre y post cambio para detectar si hubiera una variación significativa.

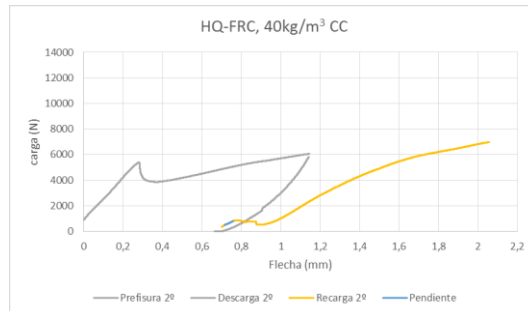


Figura 110. Gráfica de la recarga a 44 días de la segunda probeta de prefisura.

Las pendientes calculadas son (ver Tabla 22):

Pendientes recarga (44d)				Pendientes acompañamiento (44d)					
Recarga				Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 40 CC	5538,82	7785,39255	5380,54	19175,896	20702,379	22633,788	10161,1526	10671,49	11095,01
HQ-FRC, 40 CC	-	8095,61877	-						

Tabla 22. Pendientes calculadas para HQ-FRC CC, 40 kg/m³ y abertura de fisura de 0,3 mm.

La variación de la pendiente de la probeta segunda antes y después de la variación en la curva de recarga parece poco significativa. Además es mayor después del cambio que antes de forma que no se podría tratar de una recuperación de la rigidez.

- 70 kg/m³ de fibras

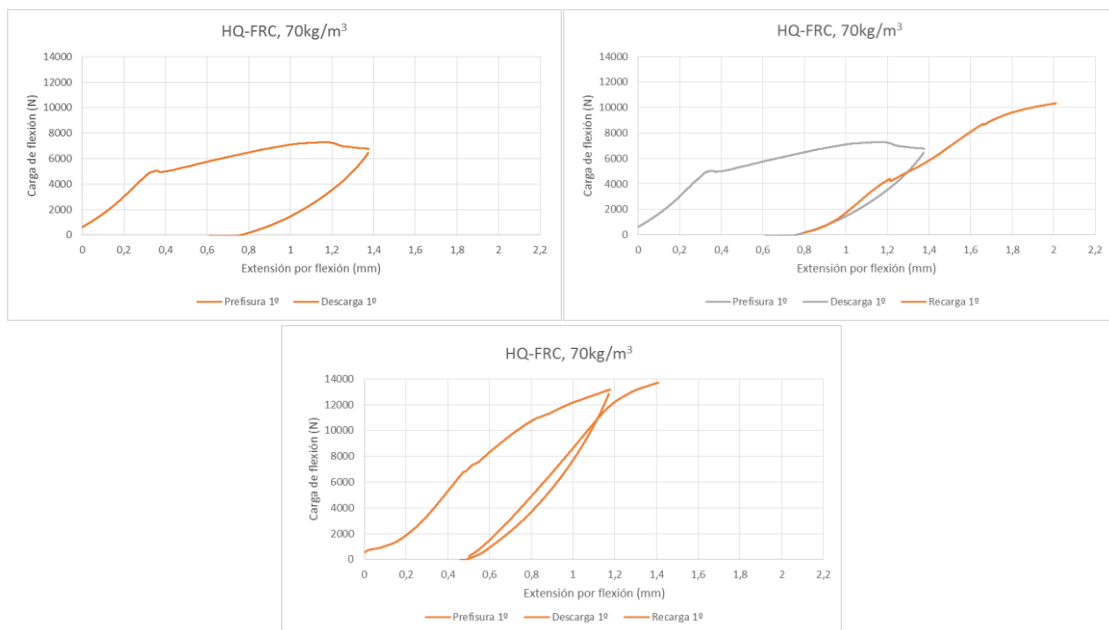


Figura 111. Gráficas HQ-FRC CC, 70 kg/m³ y abertura de fisura de 0,3 mm.

Las probetas ensayadas a dos días alcanzan una carga pico alrededor de 5000 N, mientras que a 44 días es de 7000 N. No se han observado variaciones en las pendientes de recarga a 44 días después del sanado que pudieran indicar una recuperación de la rigidez.

Los resultados de los cálculos de las pendientes son los siguientes:

Pendientes recarga (44d)				Pendientes acompañamiento (44d)					
Recarga				Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 70 CC	13841,4534	14496,281	16358,2391	18757,452	18801,6	12266,49	17688,6	11268,02	15689,5

Tabla 23. Pendientes calculadas para HQ-FRC CC, 70 kg/m³ y abertura de fisura de 0,3 mm.

4.2.2.3 Resultados UHPFRC

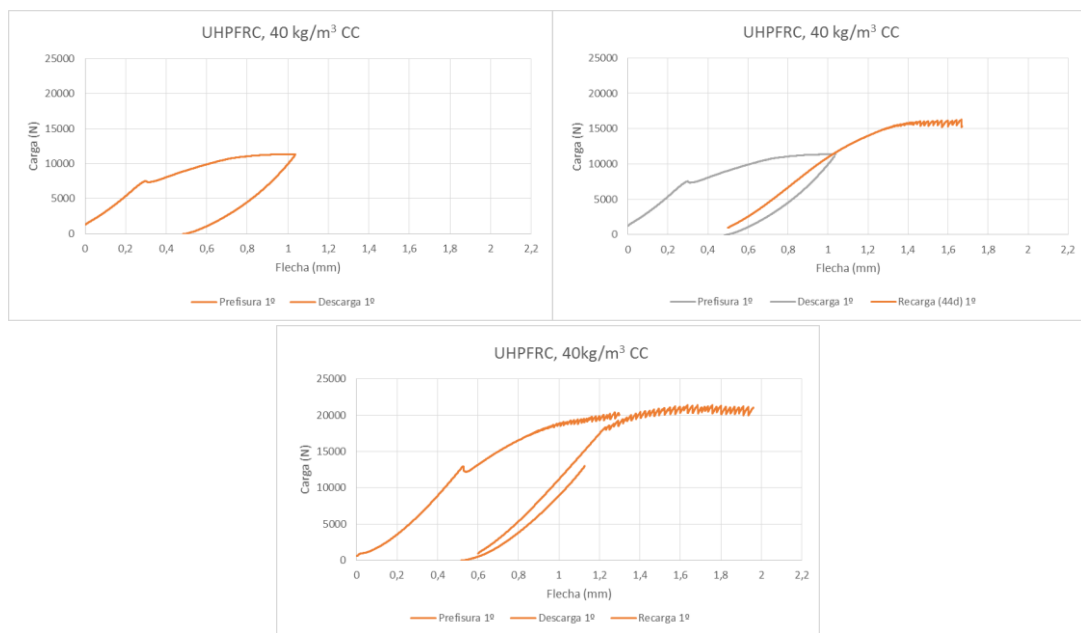


Figura 112. Gráficos UHPFRC CC, 40 kg/m³ y abertura de fisura 0,1 mm.

Las curvas de prefisura a dos días en las probetas de muy alto rendimiento alcanzan cargas pico alrededor de 7000 N, mientras que a 44 días la carga pico está alrededor de los 12500 N. A pesar de tener un contenido de 40 kg/m³ al igual que otras amasadas de HQ-FRC muestra un comportamiento de endurecimiento a flexión mucho más claro debido a las fibras de alto límite elástico.

Los resultados del cálculo de las pendientes para las probetas de UHPFRC son los siguientes:

Pendientes recarga (44d)				Pendientes acompañamiento (44d)					
Recarga				Prefisura			Recarga		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3	Probeta1	Probeta2	Probeta3
UHPFRC, 40 CC	20331,16	19545,55	23357,53	28533,77	27389,22	-	28256,25	26804,01	-

Tabla 24. Pendientes calculadas para UHPFRC CC.

4.2.2.4. Conclusiones extraídas del cálculo de las pendientes

Para el cálculo de las pendientes ha habido varios factores que se han considerado:

- Debido al acople de los diferentes componentes de la prensa durante los primeros momentos del ensayo a flexión y de la propia probeta sobre los rodillos, las partes iniciales de las curvas de carga y recarga se han intentado evitar de forma que las pendientes calculadas no se vieran afectadas por estos efectos.
- Aun procurando la precarga de la probeta antes de comenzar el ensayo las curvas se van visto afectadas por estos efectos de asiento de la probeta sobre los apoyos y las deformaciones de los diferentes componentes de la prensa.
- Como no se han observado recuperaciones de carga pico en las probetas prefisuradas después del periodo de sanado se decide escoger un intervalo suficientemente bajo como para que si el comportamiento del hormigón ha variado debido al sanado se pueda detectar pero no tan bajo como para que el cálculo se vea influenciado por la parte de las curvas no lineal que se tiene en el inicio generalmente.
- El cálculo de pendientes se realiza en un intervalo fijo respecto a la carga pico de cada probeta de forma que sea comparable.
- El intervalo escogido es el 40 al 70% de la carga pico.
- En varios ensayos se ha obtenido una variación en la curva de recarga a 44 días de las probetas prefisuradas que daban lugar a dos pendientes, una inicial y otra final.

Estas probetas son las pertenecientes a las amasadas de SQ-FRC con 70 kg/m^3 de fibras, con aditivo cristalino W y abertura de fisura $0,1 \text{ mm}$, HQ-FRC con 40 kg/m^3 de fibras, con aditivo cristalino X y abertura de fisura de $0,1 \text{ mm}$ y HQ-FRC con 40 kg/m^3 de fibras, sin aditivo cristalino y abertura de fisura de $0,3 \text{ mm}$.

En todos estos casos se calculan las pendientes en los rangos que se consideran adecuados para su correcta obtención ya que si se usaban los intervalos marcados generales (40% - 70% de la carga pico) en la mayoría de los casos significaba la partición de la zona con la pendiente a estudiar. En el caso de las probetas de SQ-FRC y de HQ-FRC con 40 kg/m^3 de fibras, sin aditivo cristalino se concluye con que las variaciones de las pendientes observadas no son significativas.

En el caso de las probetas de HQ-FRC con 40 kg/m^3 de fibras, con aditivo cristalino X si que se observa que la pendiente anterior al cambio en la curva es mayor a la posterior por lo que se calcula directamente la pendiente anterior y será la que servirá para el cálculo de la recuperación de la rigidez.

- Se hace notar que la obtención de pendientes mayores en las curvas de recarga de las probetas de acompañamiento que en las de prefisura de las mismas probetas podría deberse a algún error de medición o de obtención de los resultados, ya que no puede ser mayor la rigidez después de fisurar que antes.
- Si las pendientes de recarga de las probetas prefisuras a 44 días fueran mayores que las pendientes de recarga de las probetas de acompañamiento a 44 días significaría que durante la exposición al ambiente de sanado la probeta habría ganado rigidez. Esto pasa en las probetas de SQ-FRC con 70 kg/m^3 de fibras y sin aditivo cristalino.

- Si las pendientes de recarga de las probetas prefisuras a 44 días fueran mayores que las pendientes de prefisura de las probetas de acompañamiento a 44 días significaría que durante la exposición al ambiente de sanado la probeta habría sanado completamente.
- Habría que estudiar más en profundidad si la recuperación de rigidez obtenida en las probetas de SQ-FRC con 70 kg/m^3 de fibras y sin aditivo se deben al sellado y sanado de la fisura debido al *self-healing*.

4.2.3 Evaluación de la sanación (SH)

La sanación como recuperación de las propiedades mecánicas en este trabajo se evalúa en términos de recuperación de la carga pico y de la rigidez en las probetas prefisuradas a dos días y recargadas a 44 después del periodo de sanado.

Como se ha expuesto en el apartado 4.2.1 no se ha dado una recuperación de la carga pico en las probetas o no se ha podido observar.

La recuperación de la rigidez que implicaría el posible sanado de las fisuras se calcula primero de la siguiente manera (fórmula propuesta en el borrador del CEN):

$$R_{\text{rigidez}} = \frac{P_{\text{recarga}(44d)} - P_{\text{acomp,recarga}(44d)}}{P_{\text{acomp,prefisura}(44d)} - P_{\text{acomp,recarga}(44d)}}$$

Los resultados del cálculo de la recuperación de la rigidez para cada probeta prefisurada expuesta al ambiente de sanado son los siguientes (ver Tabla 25):

Amasada	Recuperación de rigidez		
	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC 40, 0,1 CC	-0,334	-0,545	-0,571
HQ-FRC 40, 0,3 CC (pte ₀)	-0,501	-0,280	-0,516
HQ-FRC 40, 0,3 CC (pte _f)	-	-0,250	-
HQ-FRC, 40, 0,1 CCA W	-0,420	0,192	-0,080
HQ, 70, 0,1 CC	0,299	-0,793	-0,587
HQ, 70, 0,3 CC	-0,603	-0,223	0,855
SQ, 70, 0,1 CC	0,551	0,234	0,082
HQ, 70, 0,1 CCA X	-1,797	-0,355	-0,540
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte ₀)	-1,748	-2,051	-2,440
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte _f)	-1,681	-2,418	-2,274
UHP, 40, 0,1 CC	-16,689	-18,510	-9,673

Tabla 25. Recuperación de la rigidez por amasada y probeta.

Las amasadas que se indican con (pte₀) o (pte_f) se refieren a las probetas en las cuales se han obtenido dos pendientes en la curva de recarga de la probeta prefisurada a 44 días.

Se compara a continuación los resultados en función de la adición de los aditivos cristalinos (ver Tabla 26):

	Recuperación de rigidez		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 40, 0,1 CCA W	-0,420	0,192	-0,080
HQ-FRC 40, 0,1 CC	-0,334	-0,545	-0,571

	Recuperación de rigidez		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ, 70, 0,1 CCA X	-1,797	-0,355	-0,540
HQ, 70, 0,1 CC	0,299	-0,793	-0,587

	Recuperación de rigidez		
Amasada	Probeta1	Probeta2	Probeta3
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte ₀)	-1,748	-2,051	-2,440
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte _f)	-1,681	-2,418	-2,274
SQ, 70, 0,1 CC	0,551	0,234	0,082

Tabla 26. Recuperación de la rigidez y contenido de aditivo cristalino.

Con los resultados anteriores se hacen las siguientes observaciones:

- Como se observa en las tablas la mayoría de resultados son negativos. Estos resultados significarían que el periodo de exposición en el agua no solo no ha sanado la fisura, sino que ha contribuido a un menor desarrollo de la rigidez de la probeta, empeorando su resistencia.
- Comparando los resultados de las probetas con aditivo cristalino y sin aditivo cristalino no se puede establecer una relación entre sanación y uso de aditivo cristalino ya que en algunos casos la adición del aditivo ha mejorado de forma global el comportamiento comparado con las probetas sin aditivo (HQ-FRC con 40 kg/m³ para abertura de fisura 0,1 mm) pero en el caso de HQ-FRC con 70 kg/m³ de fibras y abertura de fisura de 0,1 mm los mejores resultados son los obtenidos en las probetas control, llegando a mejorar la rigidez.
- Tampoco se puede establecer de forma clara una relación entre recuperación de rigidez y cantidad de fibras por metro cúbico añadidas al hormigón.
- De igual forma, tampoco es clara la relación entre daño inicial y sanado.
- Los peores resultados se han obtenido para el caso del hormigón de muy alto rendimiento.

A continuación se calcula la rigidez que implicaría el posible sanado de las fisuras mediante la fórmula alternativa:

$$R_{rigidez} = \frac{P_{recarga(44d)}}{P_{acomp,prefisura(44d)}}$$

Los resultados obtenidos con la fórmula alternativa son los siguientes (ver Tabla 27):

Amasada	Recuperación de rigidez		
	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC 40, 0,1 CC	0,738	0,572	0,552
HQ-FRC 40, 0,3 CC (pte ₀)	0,520	0,732	0,506
HQ-FRC 40, 0,3 CC (pte _f)		0,761	
HQ-FRC, 40, 0,1 CCA W	0,629	1,170	0,930
HQ, 70, 0,1 CC	1,147	0,611	0,712
HQ, 70, 0,3 CC	0,930	0,974	1,099
SQ, 70, 0,1 CC	1,345	1,146	1,051
HQ, 70, 0,1 CCA X	0,671	0,935	0,901
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte ₀)	0,659	0,599	0,524
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte _f)	0,672	0,528	0,556
UHP, 40, 0,1 CC	0,739	0,710	0,848

Tabla 27. Valores de la recuperación de la rigidez obtenidos con la fórmula alternativa.

Se compara a continuación los resultados en función de la adición de los aditivos cristalinos (ver Tabla 28):

Amasada	Recuperación de rigidez		
	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ-FRC, 40, 0,1 CCA W	0,629	1,170	0,930
HQ-FRC 40, 0,1 CC	0,738	0,572	0,552

Amasada	Recuperación de rigidez		
	Probeta1	Probeta2	Probeta3
HQ, 70, 0,1 CCA X	0,671	0,935	0,901
HQ, 70, 0,1 CC	1,147	0,611	0,712

Amasada	Recuperación de rigidez		
	Probeta1	Probeta2	Probeta3
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte ₀)	0,659	0,599	0,524
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte _f)	0,672	0,528	0,556
SQ, 70, 0,1 CC	1,345	1,146	1,051

Tabla 28. Valores de la recuperación de la rigidez comparados entre amasadas con aditivo y sin aditivo.

La Figura 113 recoge los valores anteriores (Tabla 28) para una comparación de los resultados más fácil:

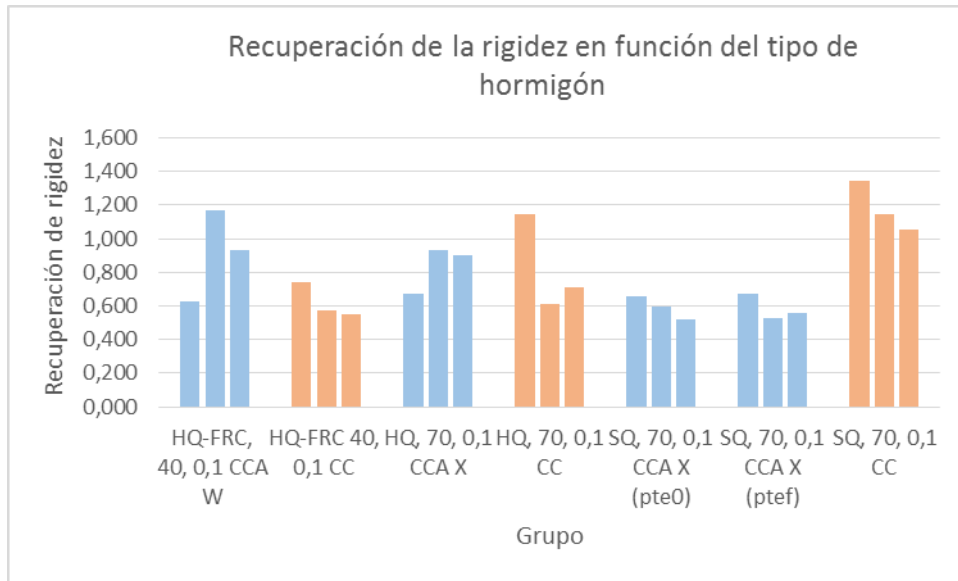


Figura 113. Recuperación de la rigidez en función del tipo de hormigón.

Como se puede observar, la mayor recuperación de rigidez se da en las probetas de hormigón SQ-FRC con cantidad de fibras 70 kg/m³ y sin aditivo cristalino. Esta recuperación podría deberse a la sanación autógena.

Los menores valores de sanación se obtienen para este mismo tipo de hormigón pero con aditivo cristalino.

Se compara también la sanación en función de la cantidad de fibras para hormigones con aditivo cristalino y sin aditivo cristalino (ver Tabla 29, ver Figura 114 y Figura 115).

Amasada	Recuperación de rigidez		
HQ-FRC 40, 0,1 CC	0,738	0,572	0,552
HQ-FRC 40, 0,3 CC (pte ₀)	0,520	0,732	0,506
HQ-FRC 40, 0,3 CC (pte _f)		0,761	
UHP, 40, 0,1 CC	0,739	0,710	0,848
HQ, 70, 0,1 CC	1,147	0,611	0,712
HQ, 70, 0,3 CC	0,930	0,974	1,099
SQ, 70, 0,1 CC	1,345	1,146	1,051

Amasada	Recuperación de rigidez		
HQ-FRC, 40, 0,1 CCA W	0,629	1,170	0,930
HQ, 70, 0,1 CCA X	0,671	0,935	0,901
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte ₀)	0,659	0,599	0,524
SQ, 70, 0,1 CCA X (pte _f)	0,672	0,528	0,556

Tabla 29. Sanación en función de la cantidad de fibras para hormigones sin aditivo (naranjas) y hormigones con aditivo (azules).

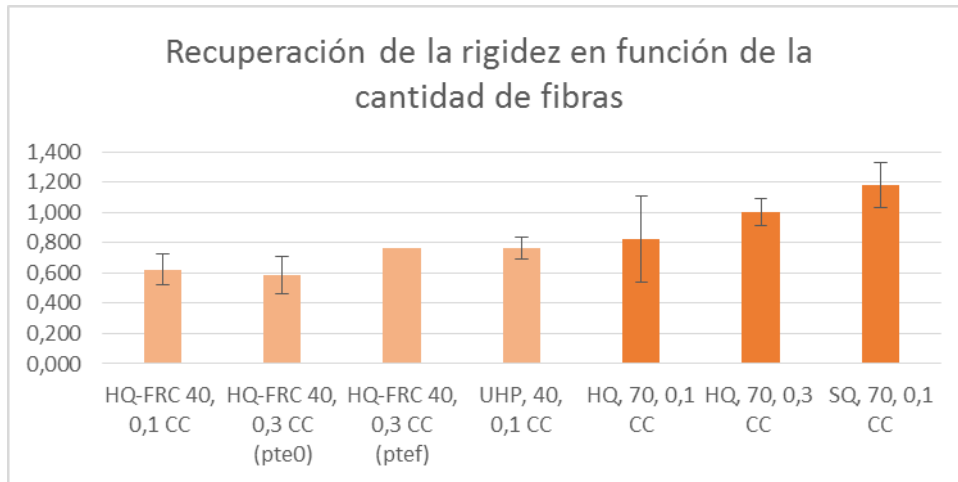


Figura 114. Recuperación de la rigidez en función de la cantidad de fibras para hormigones control (CC).

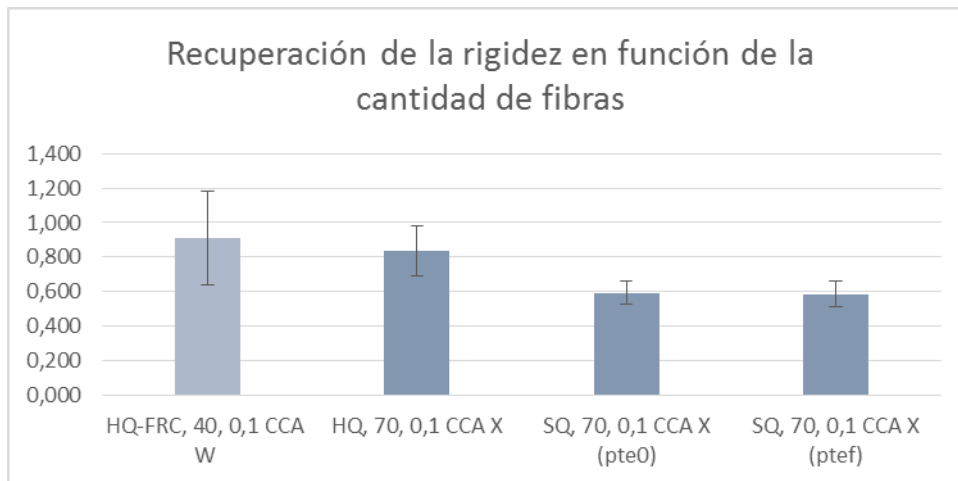


Figura 115. Recuperación de la rigidez en función de la cantidad de fibras para hormigones con aditivo cristalino (CCA).

La Figura 114 y Figura 115 muestran los valores medios y la desviación típica de la recuperación de rigidez para cada tipo de hormigón ensayado. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Respecto a la recuperación de rigidez en probetas control (Figura 114) los mejores resultados se obtienen para la cantidad de fibras de 70 kg/m^3 tanto para los hormigones de HQ-FRC como para el hormigón de SQ-FRC, independientemente de la abertura de fisura.
- Los resultados del hormigón de UHPFRC presentan la menor desviación.
- Para los hormigones con aditivos cristalinos (Figura 115) se ve que los resultados son mejores en el caso de los hormigones HQ-FRC pero tienen menor desviación en el caso de SQ-FRC.
- Comparando los resultados de control con los de aditivos cristalinos, el uso de este producto ha producido una ligera mejora en el caso de hormigón de HQ-FRC cuando se usa con un contenido en fibras de 40 kg/m^3 y una media equivalente pero con menor desviación en el caso de un contenido en fibras de 70 kg/m^3 .
- Los valores de recuperación calculados para las curvas que han presentado dos tramos de pendientes en la recarga a 44 días (pte_0 y pte_f) son similares, por lo que el uso de una u otra en el cálculo de la sanación no afectará notablemente en los resultados.

4.2.4 Conclusiones sobre la sanación de las fisuras

En este proyecto se ha evaluado la sanación de las fisuras en términos de recuperación de carga pico y rigidez después de someter a las probetas a la fisuración y exponerlas a un ambiente de sanado consistente en agua a 30°C.

Durante los ensayos no se ha podido observar una recuperación clara de la carga pico, excepto en una probeta. Sin embargo esta recuperación supone apenas un 2,8% de la carga pico de la probeta.

Respeto a la recuperación de la rigidez, con la fórmula propuesta en el borrador del CEN, 8 de 9 de los hormigones fabricados y ensayados han evidenciado la pérdida de rigidez de las probetas al estar expuestas al ambiente de sanado. Solo las tres probetas de una amasada (SQ-FRC con 70 kg/m³ de fibras, sin aditivo cristalino y con abertura de fisura de 0,1 mm) han presentado resultados que hacen pensar en una recuperación de la rigidez. En este caso la recuperación podría deberse al sanado autógeno del hormigón o a la rigidización de la matriz de hormigón, habría que estudiar más en profundidad este aspecto en futuras investigaciones.

Respeto a la recuperación de la rigidez, con la fórmula alternativa, se ha visto una dependencia con el contenido en fibras y una diferencia de comportamiento para los diferentes hormigones cuando se ha utilizado el aditivo cristalino. La mejora en la recuperación de rigidez, puede estar causada más que por una mejora de la matriz, como una mejora de la adherencia fibra-matriz en la sección fisurada. Los resultados muestran que el uso de aditivo cristalino ha producido una mejora en los hormigones de calidad alta (HQ-FRC), que tienen un mayor contenido en cemento y menor relación agua/cemento, pero en el hormigón de calidad estándar (SQ-FRC) la tendencia ha sido la contraria. Esto podría deberse a un mayor contenido en partículas de cemento sin hidratar en el grupo HQ-FRC, que estarían disponibles para su reacción con el aditivo. No obstante, se necesitan estudios específicos para confirmarlo.

Debido a la falta de un pico de resistencia tras el sanado, que correspondería con la recuperación de la resistencia de la matriz, habría que plantearse si se está pasando por alto un pequeño pico de sanación debido a la precisión de los métodos de ensayo como consecuencia de una sanación no muy evidente. Aún si fuera este el caso, habría que valorar si seguir mejorando la precisión de los métodos para la obtención de este o si su pequeña magnitud no resultaría de interés para su aplicación a obra y por tanto sería más conveniente promover la investigación para mejorar los aditivos autosanables.

5.1 Introducción

La aplicación práctica de este trabajo se inicia con la demolición y reconstrucción de una estructura en la que se ubicaba una turbina para los procesos de obtención de almidones y glucosas de la empresa ROQUETTE-Laisa España, S.A. Esta estructura era antigua y presentaba diversas patologías, por lo que se decide construir una nueva que cumpla con la misma función. La aplicación práctica tiene por objeto la valoración de la introducción en esta nueva estructura de aditivos cristalinos como método de reparación de fisuras incipientes en el supuesto en el que ayudaran al sellado y la recuperación de la resistencia frente a la reparación mediante métodos convencionales.

Se realizarán una serie de supuestos de fisuración para la nueva estructura basados en la fisuración que presentó la estructura original.

5.2 Localización.

La estructura que será objeto de la aplicación práctica forma parte de una nave industrial de la empresa ROQUETTE-Laisa España, S.A situada en el polígono Industrial Fuente Musa de Benifaió (Valencia).

Benifaió se localiza en la Comarca de la Ribera Alta, limitando con Almussafes al norte, con Sollana al este, con Alginet al sur y por el oeste con Llombay.



Figura 116. Localización de la nave industrial en la Comarca y ampliación para su situación en el Polígono Industrial de Benifaió.

5.3 Descripción

La empresa Roquette elabora almidones y glucosas a partir de boniatos y maíz para la fabricación de productos tanto alimenticios como industriales a partir del maíz no transgénico. Una zona de su nave industrial de Benifaió será la estructura objeto de la aplicación práctica de este proyecto.

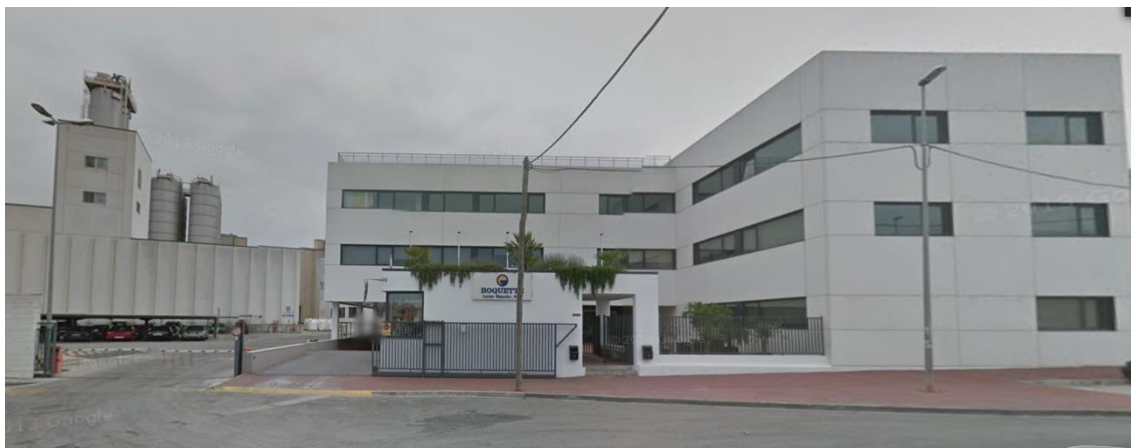


Figura 117. Nave industrial de la empresa ROQUETTE Laisa España, S.A extraída de Google Maps. Edificio de oficinas delante y nave industrial detrás.

La zona de interés para este proyecto está formada por pórticos de perfiles laminados de acero estructural de sección tipo HEB160 y HEB180, rígidamente unidos entre sí. En el interior está construida una base de hormigón armado de 4,2 x 3,7 m situada a la cota 2,11 m sobre la que apoya una losa. Esta zona se sombrea en rojo en las imágenes extraídas de los planos de AutoCAD, tanto de alzado como de planta (Figura 118 y Figura 119).

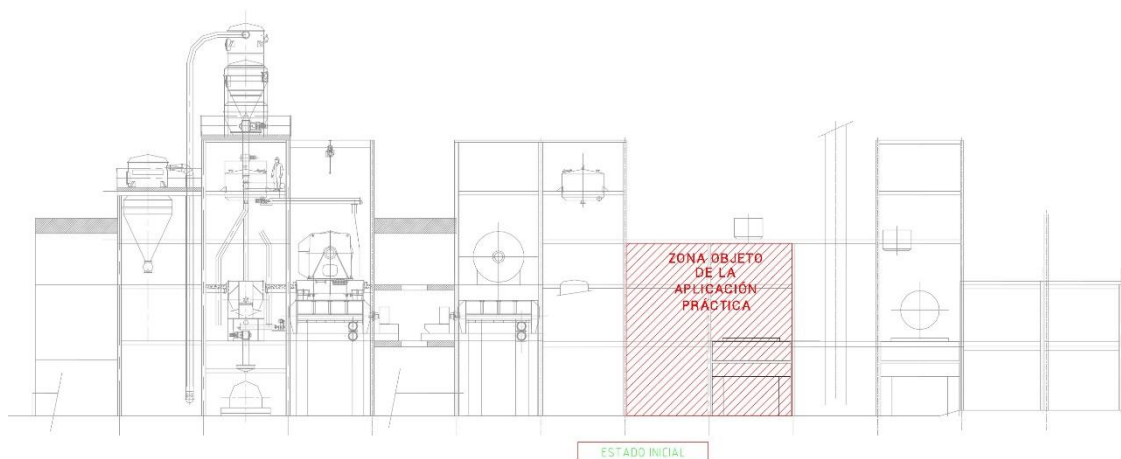


Figura 118. Plano AutoCAD del alzado de la nave industrial. En rojo se remarca la zona objeto de la aplicación práctica.

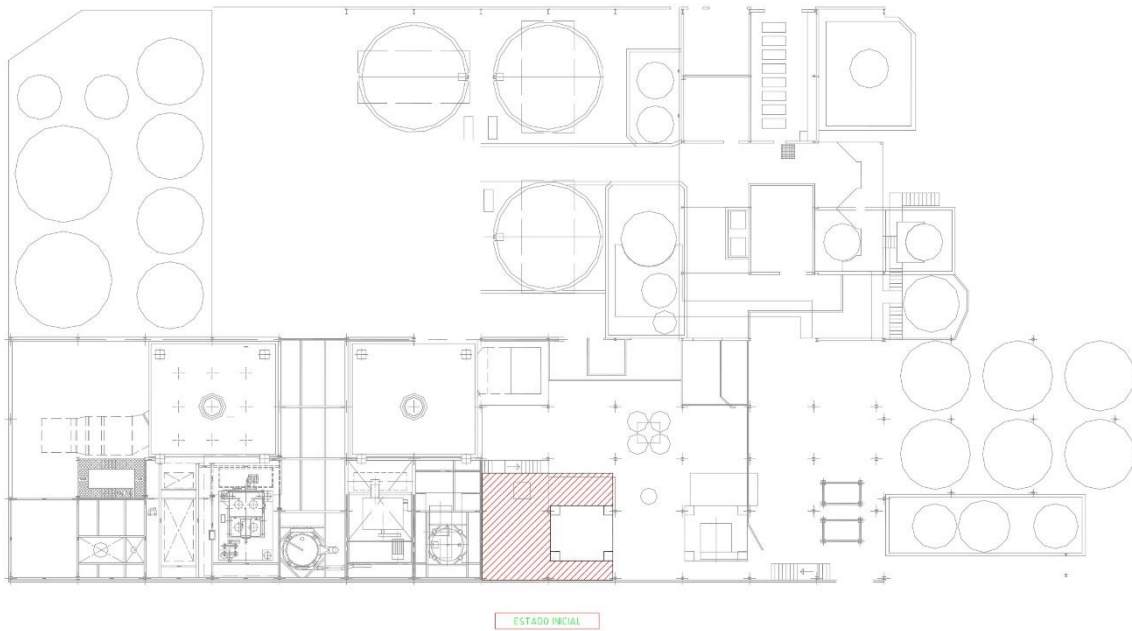


Figura 119. Plano AutoCAD de la planta de la nave industrial. En rojo se remarca la zona objeto de la aplicación práctica.

Esta instalación es antigua y está en desuso desde que en 2011 se quitara la turbina situada sobre la losa. Además, presenta diferentes patologías entre las cuales están la fisuración de las bases de hormigón armado, fisuración de la losa y fisuración de los pilares (ver Figura 120, Figura 121, Figura 122 y Figura 123).



Figura 120. Fisuración de las bases de hormigón.

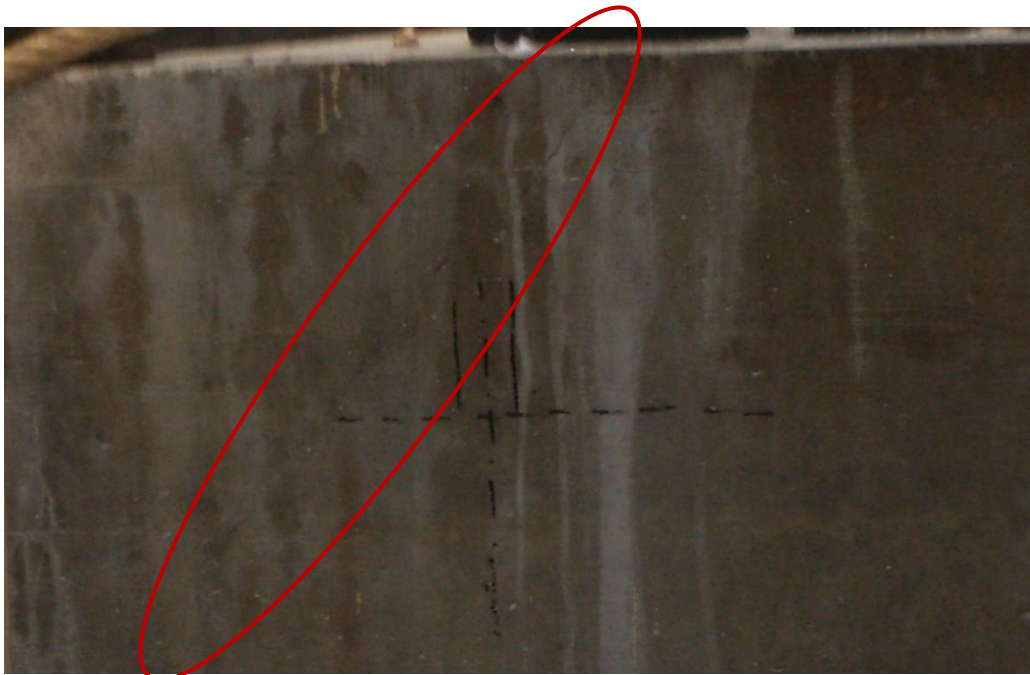


Figura 121. Fisuración de una base de hormigón armado.



Figura 122. Patología de uno de los pilares que sujeta la losa en la que apoya la turbina.



Figura 123. Patología de uno de los pilares que sujeta la losa sobre la que apoya la turbina.

Debido al estado en el que se encuentra la estructura, se plantea su demolición para construir una nueva en la que ubicar una nueva turbina y una zona para el secado del almidón. La demolición implicaría a la estructura de hormigón armado sobre la que apoya la losa, la losa y dos forjados.

En total la superficie construida a demoler es de 62.88 m² en planta y se corresponde con un volumen total de 63.37 m³, siendo el presupuesto de ejecución material de 9.297,72 €.

La solución adoptada para la nueva estructura consiste en una estructura soporte de hormigón armado sobre la que apoya una losa donde se ubicará la nueva turbina y el secadero de almidón. Debido a que los asientos diferenciales podrían motivar el colapso de la estructura o la paralización de su servicio se prevé la cimentación mediante losa de hormigón armado.

La losa de cimentación tendrá una forma rectangular en planta con unas dimensiones de 4,85 x 3,80 m, con un canto de 0,80 m. El hormigón fabricado para su construcción será HA-25/B/20/IIa.

Esta losa sirve de cimentación para cuatro pilares-soportes de hormigón armado del mismo tipo que la losa (HA-25/B/20/IIa), de sección cuadrada 0,60 x 0,60 m, que están atados en cabeza mediante una viga de atado, o viga anillo, de canto 1,00 m.

Sobre este conjunto apoya una losa de hormigón armado del mismo tipo que los anteriores, de planta rectangular de dimensiones 4,65 x 3,60 m, con un canto de 0,70 m sobre la que se instalará la turbina y secadero de almidón.

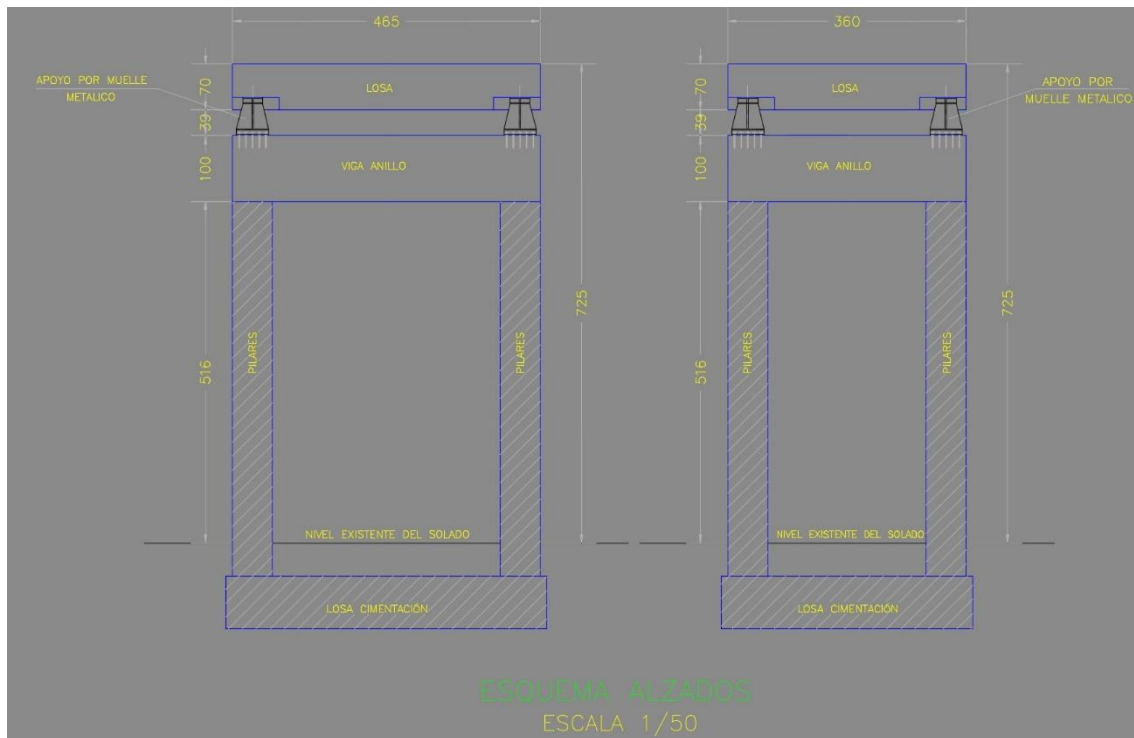


Figura 124. Plano AutoCAD de alzados de la nueva estructura. Losa de cimentación, pilares, viga anillo y losa.

El Presupuesto de Ejecución Material de esta obra asciende a 18.480,58 € y el plazo de ejecución de las obras es de tres meses.

En total, para las obras de demolición y construcción de la nueva estructura el presupuesto de ejecución material es de 27.778,3 € y el plazo de ejecución de 4 meses.

Suponiendo que la estructura nueva proyectada en un futuro podría tener unas patologías similares a la estructura antigua a la que reemplaza (aunque menos desarrolladas) debido a que estará sometida a acciones muy similares a las que han originado las fisuras en la estructura antigua y que los aditivos cristalinos sellaran de forma más efectiva las fisuras y se consiguiera una recuperación de la resistencia se plantea el estudio económico de la viabilidad de la adición de aditivos cristalinos frente a la reparación de las fisuras.

5.4 Suposición de reparación de las fisuras

En el caso de la nueva estructura que ocupa a este proyecto se hace un supuesto de que presenta fisuración en los pilares por cortante debido a las vibraciones de la turbina y por tanto necesita un mantenimiento correctivo.

Para la reparación de forma que se protejan las armaduras es necesaria la preparación tanto de la superficie a reparar como de las armaduras afectadas por la fisuración. El sistema de reparación elegido incluye el repicado del hormigón, saneado y cepillado de las armaduras con medios manuales y chorro de arena, pasivado de las armaduras, imprimación anticorrosiva y puente de unión con mortero polimérico de resinas epoxi, restitución de la parte afectada con mortero polimérico de reparación y carga manual de escombros sobre contenedor. El coste por m² es de

166,52 € incluyendo la mano de obra y el material necesario. Este precio se ha tomado consultando las bases de datos del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña.

Considerando una fisura por cortante que atraviesa cada uno de los cuatro pilares de sección 0,6 x 0,6 m, y un espesor de reparación de 3 cm por arriba y por debajo de la fisura, la reparación de un pilar implicaría:

$$l_{fisura1} = 0,6 \text{ m}$$
$$l_{fisura2} = \frac{0,6}{\cos 45} = 0,85 \text{ m}$$

$$\text{Superficie a reparar de un pilar (m}^2\text{)} = 2 * 0,06 * (l_{fisura1} + l_{fisura2})$$

$$\text{Superficie a reparar de un pilar (m}^2\text{)} = 2 * 0,06 * (0,6 + 0,85) = 0,174 \text{ m}^2$$

Por lo que la superficie a reparar de los 4 pilares es 0,696 m², como el coste de la reparación es de 166,52 € el m², la reparación de los 4 pilares supondría un coste de:

$$\text{Coste reparación pilares} = 166,52 \text{ €/m}^2 * 0,696 \text{ m}^2 = 115,9 \text{ €}$$

5.5 Alternativa de introducción de aditivos cristalinos en el hormigón

Como la estructura anterior presentó fisuración en los pilares y en el supuesto de que los aditivos cristalinos sellaran y dotaran a la estructura de una cierta recuperación de resistencia, se considera la introducción de aditivos cristalinos en el hormigón de forma que las pequeñas fisuras incipientes se puedan ver reducidas y no presenten un desarrollo completo.

La cantidad de aditivos cristalinos a introducir en el hormigón se calcula en base a la cantidad de cemento.

Para un tipo de hormigón armado expuesto a un ambiente IIa el contenido mínimo en cemento según la EHE es de 275 kg/m³. La construcción de los cuatro pilares implicaría el siguiente volumen de hormigón:

$$\text{Volumen}_{pilares} = 4 * (0,6 * 0,6 * 5,66) = 8,15 \text{ m}^3$$

Por lo que para la construcción de los nuevos pilares son necesarios aproximadamente 2241,25 kg de cemento.

Si se dosifica el aditivo cristalino en un 2% sobre los kg de cemento (dosificación habitual en obra), la cantidad de aditivo cristalino a usar es de 44,825 kg.

El precio base del aditivo cristalino es de 8,15 €/kg, por lo que el coste de la introducción de aditivos cristalinos en el hormigón de los pilares es de:

$$\text{Coste introducción aditivo cristalino} = 8,15 \frac{\text{€}}{\text{kg}} * 44,825 \text{ kg} = 365,32 \text{ €}$$

5.6 Comparación económica

El precio de la reparación de las fisuras es de 115,9 € y el precio de la introducción de aditivos cristalinos en los pilares es de 365,32 €, suponiendo en principio la introducción de los aditivos cristalinos un coste tres veces más caro.

Sin embargo en el coste de la reparación no están incluidos los costes indirectos que puede suponer mantener la estructura fuera de servicio debido a los trabajos de reparación. Además y debido a las acciones que soporta la estructura, lo más probable es que para asegurar que las fisuras reparadas no se continuaran abriendo fuera necesario el refuerzo de los pilares, incrementando aún más el coste total que supondría la fisuración de los pilares.

En cambio, la inversión de 365,32 € en la construcción, que supondría un aumento del 1,3% del presupuesto de ejecución material del derribo y la nueva construcción, puede suponer a largo plazo una fisuración menor y por tanto menor inversión en reparaciones a lo largo de la vida útil de la estructura, resultando esta inversión inicial rentable.

5.7 Conclusiones

La introducción de aditivos cristalinos en obra ya sea como adición al hormigón o en forma de morteros de reparación sigue siendo objeto de debate. En obras en las que la impermeabilidad es un factor importante y hay presencia de agua se han usado de forma efectiva, sin embargo cuando el objetivo es la recuperación de la resistencia no es tan fácil de evaluar la rentabilidad pues la recuperación de las propiedades mecánicas en el hormigón sigue siendo objeto de investigaciones y más aún en el caso de uso de aditivos cristalinos como agente sanador.

Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas

6.1 Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo son:

- La recuperación de la rigidez se ha evaluado siguiendo la fórmula propuesta en el borrador del CEN y mediante una fórmula alternativa. Con la fórmula propuesta por el CEN los resultados presentan más dispersión y son difíciles de interpretar, en cambio con la fórmula alternativa se ven más claras las relaciones entre la recuperación de la rigidez y el uso de aditivos o la cantidad de fibras añadidas al hormigón.
- Los resultados de recuperación de rigidez han sido mayores en el caso de usar aditivos cristalinos para las probetas fabricadas con hormigones de alta calidad (HQ-FRC), mientras que en el caso de las probetas control la recuperación de la rigidez ha sido mayor para las probetas de SQ-FRC. Esto podría deberse a un mayor contenido en partículas de cemento sin hidratar en el grupo HQ-FRC, que estarían disponibles para su reacción con el aditivo.
- Respecto a la recuperación de rigidez en probetas control los mejores resultados se obtienen para la cantidad de fibras de 70 kg/m^3 tanto para los hormigones de HQ-FRC como para el hormigón de SQ-FRC, independientemente de la abertura de fisura. Esto podría deberse más que a una mejora de la matriz, a una mejora de la adherencia fibra-matriz en la sección fisurada.
- Los resultados de rigidez en las probetas de UHPFRC tienen menor desviación.
- Los valores de recuperación calculados para las curvas que han presentado dos tramos de pendientes en la recarga a 44 días (pte_0 y pte_f) son similares, por lo que el uso de una u otra en el cálculo de la sanación no afectará notablemente a los resultados.
- Tanto en los hormigones en los que se añadió aditivo cristalino como en los de control no se han obtenido recuperaciones de cargas pico significativas después de la exposición de las probetas al ambiente de sanado.

Finalmente, se puede concluir que tanto la sanación autógena como la debida al uso de aditivos cristalinos no son suficientes para garantizar la recuperación de las propiedades mecánicas de forma notable, por lo que se justifica la necesidad de estudios de otros diseños de hormigón autosanable que permitan obtener unas propiedades de autosanación suficientes como para justificar el coste.

6.2 Futuras líneas

Se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Extender estos ensayos de recuperación de rigidez y carga pico a hormigones de UHPFRC conteniendo aditivos cristalinos, ya que tienen mayor cantidad de cemento y menor relación agua/cemento.
- Cálculo de los índices de sanación con los parámetros obtenidos en este trabajo mediante las ecuaciones propuestas por Ferrara para la comparativa de resultados.

- Para estudiar la relación recuperación de la rigidez-cantidad de fibras se propone estudiar el comportamiento con diferentes cantidades de fibras y de distintos tipos.
- Analizar y comparar resultados de recuperación de la rigidez y carga pico con otros agentes sanadores, por ejemplo, bacterias.
- Ensayos para comprobar las reacciones de los aditivos cristalinos utilizados.

- [1] H. Mihashi y T. Nishiwaki, «Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete,» *Journal of Advanced Concrete Technology. Materials, Structures and Environment.*, vol. 10, pp. 170-184, 2012.
- [2] C. Edvardsen, «Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete,» *ACI Materials Journal*.
- [3] K. Van Tittelboom y N. De Belie, «Self-Healing in Cementitious Materials-A Review,» pp. 2182-2217, 27 Mayo 2013.
- [4] M. De Rooij, K. Van Tittelboom, N. De Belie y E. Schlangen, «Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials,» vol. 11.
- [5] Á. A. Mendoza G, *Estudio de las propiedades mecánicas del sistema óseo.*, Universidad Nacional de Colombia.
- [6] N. ter Heide, *Crack healing in hydrating concrete*, Delft, 2005.
- [7] L. Ferrara, V. Krelani y M. Carsana, *A "fracture testing" based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures*, vol. 68, *Construction and Building Materials*, 2014, pp. 535-551.
- [8] D. Homma, H. Mihashi y T. Nishiwaki, *Self-Healing Capability of Fiber Reinforced Cementitious Composites*, vol. 7, *Journal of Advance Concrete Technology*, 2009, pp. 217-228.
- [9] Desconocido, *Hidratación del cemento Portland*.
- [10] H. Huang, G. Ye y L. Pel, *New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests*, *Materials and Structures*, 2015.
- [11] H. Huang, G. Ye y D. Damidot, *Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste*, vol. 52, *Elsevier*, 2013, pp. 71-81.
- [12] H.-W. Reinhardt y M. Jooss, *Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width*, 2003.
- [13] T. Van Tittelboom, E. Gruyaert, H. Rahier y N. De Belie, *Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation*, vol. 37, *Construction and Building Materials*, 2012, pp. 349-359.
- [14] T. Nishiwaki, M. Koda, M. Yamada, H. Mihashi y T. Kikuta, *Experimental Study on Self-Healing Capability of FRCC Using Different Types of Synthetic Fibers.*, vol. 10, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2012, pp. 195-206.
- [15] V. Krelani y L. Ferrara, *Self-Healing capacity od concrete with crystalline additives: natural vs. accelerated exposure conditions*.

- [16] M. Roig-Flores, F. Pirritano, P. Serna y L. Ferrara, *Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests*, Elsevier, 2016, pp. 447-457.
- [17] S. Qian, J. Zhou y E. Schlangen, *Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behaviour of Engineered cementitious composites*, vol. 32, Elsevier, 2010, pp. 686-693.
- [18] P. Termkhajornkit, T. Nawa, Y. Yamashiro y T. Saito, *Self-healing ability of fly ash-cement systems*, Elsevier, 2009, pp. 195-203.
- [19] M. Sahmaran, S. B. Keskin, G. Ozerkan y I. O. Yaman, *Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash*, Elsevier, 2008, pp. 872-879.
- [20] M. Roig Flores, *Study of the feasibility of self-healing concrete with and without crystalline admixtures*, 2015.
- [21] S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram, E. N. Brown y S. Viswanathan, *Autonomic healing of polymer composites*, vol. 409, Nature, 2001, pp. 794-797.
- [22] C. Dry, *Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices*, vol. 3, Smart Mater. Struct., 1993, pp. 118-123.
- [23] M. M. Pelletier, R. Brown, A. Shukla y A. Bose, *Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent..*
- [24] R. D. Toledo Filho, K. Ghavami, M. A. Sanjuán y G. L. England, *Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibers*, Cement and Concrete Composites, pp. 537-546.
- [25] M. Elliott, *Superabsorbent Polymers*, BASF Aktiengesellschaft.
- [26] L. H. X. D, W. H. S y B. N. R, *Self-healing cracks with superabsorbent polymers*, Imperial College London.
- [27] L. H. X. D, W. H. S y B. N. R, *The potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete*, Advances in Applied Ceramics, 2010, pp. 296-302.
- [28] D. Snoeck, K. Van Tittelboom y N. De Belie, *The use of superabsorbent polymers as a crack sealing and crack healing mechanism in cementitious materials*, A. e. al., Ed., 2012.
- [29] A. C. Institute, *Report on Chemical Admixtures for Concrete*, 2010.
- [30] J. Zhengwu, L. Wenting, Y. Zhengzheng y Y. Zhenghong, *Self-healing of cracks in concrete with various crystalline mineral additives in underground environment*.
- [31] J. Dechkhachorn y S. Raktipong, *Self-Crack Closing Ability of Mortar with Different Additives*, vol. 21, Journal of Metals, Materials and Minerals, 2011, pp. 9-17.
- [32] K. Sisomphon, O. Copuroglu y E. A. B. Koenders, *Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive*, Cement and Concrete Composites.

- [33] C. I. N. 1404, *Evaluation of self-healing mechanisms for mortar mixtures*.
- [34] A. Tae-Ho y K. Toshiharu, *Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures*, vol. 8, Journal of Advanced Concrete Technology, 2010, pp. 171-186.
- [35] H. Huang y G. Ye, *Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials*, ResearchGate, 2011.
- [36] C. Dry, M. Three designs for the internal release of sealants, adhesives and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability, vol. 30, Cement and Concrete Research, 2000, pp. 1969-1977.
- [37] C. Dry, *In-Service Repair of Highway Bridges and Pavements by Internal Time-Release Repair Chemicals*, vol. Project 37, Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs, 2001.
- [38] K. Van Tittelboom y e. al, *Methyl methacrylate as a healing agent for self-healing cementitious materials.*, Smart Mater. Struct..
- [39] L. Sun, W. Y. Yu y Q. Ge, *Experimental Research on the Self-Healing Performance of Micro-Cracks in Concrete Bridge*, Advanced Materials Research, 2011.
- [40] ReBuild, *Self-Healing of Concrete - A New Technology for a More Sustainable Future*, ReBuild.
- [41] R. Siddique y N. K. Chahal, *Effect of ureolytic bacteria on concrete properties.*, vol. 25, Construction and Building Materials, 2011, pp. 3791-3801.
- [42] K. Van Tittelboom, N. de Belie, W. D. Muynck y W. Verstraete, *Use of bacteria to repair cracks in concrete.*, Cement and Concrete Research, pp. 157-166.
- [43] A. Neville M, *Properties of Concrete*, Pearson, 1996.
- [44] H. M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu y E. Schlangen, *Application of bacteria as self-healing agents for the development of sustainable concrete.*, Ecological Engineering, 2010.
- [45] J. Wang, K. van Tittelboom, N. de Belie y W. Verstraete, *Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete*, vol. 26, Construction and Building Materials, 2012, pp. 532-540.
- [46] H. M. Jonkers, *Bacteria-based Self-healing Concrete*, HERON, 2011.
- [47] P. C. Marmol Salazar, *Hormigones con Fibras de Acero. Características Mecánicas*, Madrid: Trabajo fin de Master, 2010.
- [48] A. E. Naaman, *Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead.*, In proceedings of the Fifth International RILEM Symposium.
- [49] R. Majoral, B. Berge y P. Ribeiro, *Fibras metálicas vs fibras sintéticas en uso estructural: túneles, elementos prefabricados y pavimentos industriales: To be or not to be?*, Obras Urbanas, 2011.

- [50] UNE-EN 12350-2:2009 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayos de asentamiento.", 2009.
- [51] UNE-EN 12390-3:2009 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.", 2009.
- [52] UNE-EN 14651:2005+A1:2007 "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).".
- [53] B. Fernández y M. Isabel, *Desarrollo de productos de hormigón de muy alto rendimiento por conformado durante el proceso de fraguado*, 2015.
- [54] N. Hearn, «Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?,» *Materials and Structures / Matériaux et Constructions*, vol. 31, pp. 563-567, Octubre 1998.
- [55] L. Ferrara, V. Krelan, M. Geminiani, R. Gorleza, P. Serna Ros y M. Roig Flores, *Capacità di autoriparazione dei compositi cementizi fibrorinforzati ad elevate prestazioni*.
- [56] *Instrucción de Hormigón Estructural*, 2008.
- [57] UNE-EN 12620:2003+A1:2009.
- [58] UNE-EN 933-1:2012 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado".
- [59] UNE-EN 12350-8:2011 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento".
- [60] UNE-EN 12390-2:2009 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia".

Anejo