



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio teórico del efecto del pretensado químico en el hormigón reforzado con fibras

Trabajo realizado por:

Andrea Jenniffer Pilco Paillacho

Dirigido por:

Ignacio Segura Perez

Renan Picolo Salvador

Grado en:

Ingeniería Civil

Barcelona, **Octubre 2022**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

RESUMEN

El hormigón reforzado con fibras se ha convertido en una innovación significativa en cuanto a características como la durabilidad y resistencia, si se combina con la técnica del pretensado se obtiene un hormigón de altas prestaciones y capaz de afrontar esfuerzos superiores que un hormigón convencional.

Además, la utilización de las fibras proporciona un mejor control de fisuración ya que al distribuirse de forma aleatoria por la matriz de concreto actúan como un puente a través de las grietas que se puedan presentar en la matriz en el estado fresco, también en la fase de endurecimiento estas otorgan mayor ductilidad en el post-agrietamiento.

Las fibras son capaces de absorber una gran cantidad de energía antes de llegar al colapso por lo que su módulo de deformabilidad es mayor que el de un hormigón simple.

En el siguiente trabajo se presenta un estudio teórico del efecto del pretensado químico en el hormigón reforzado con fibras (HRF) donde se describirá los aspectos que influyen en su comportamiento, el tipo de agente expansivo para lograr el pretensado químico (óxido de calcio) y qué factores influyen sobre él. También dos modelizaciones, la primera la modelización de la expansión en un hormigón con diferentes cantidades de óxido de calcio como agente expansivo, y la segunda, una modelización del efecto de la precompresión sobre las fibras y sobre el comportamiento residual (Ensayo Barcelona) del HRF. Los datos utilizados para las modelizaciones han sido tomados del trabajo de final de máster de Domenica Montero.

ABSTRACT

Fiber-reinforced concrete has become a significant innovation in terms of characteristics such as durability and resistance. When it is combined with the prestressing technique, a high-performance concrete is obtained that is capable of withstanding greater stresses than conventional concrete.

In addition, the use of fibers provides better crack control. The fibres are distributed randomly throughout the concrete matrix and they act as a bridge through the cracks that may occur in the matrix in the fresh state, also during hardening the fibres grant greater ductility in the post-cracking.

The fibers are capable of absorbing a large amount of energy before collapsing, therefore the modulus of deformability of a reinforced concrete with fibres is greater than that simple concrete.

In the following work, a theoretical study of the effect of chemical prestressing in fiber-reinforced concrete (FRC) is presented, where the aspects that influence its behavior will be described, the type of expansive agent to achieve chemical prestressing (calcium oxide) and what factors influence about itself. Also two models, the first modeling the expansion in a concrete with different percentage of calcium oxide as expansive agent, and the second, a modeling of the effect of precompresión on the fibers and on the residual behavior (Barcelona Test) of the FRC. The data used for the modeling has been taken from Domenica Montero's master's thesis.

AGRADECIMIENTOS

Es curioso terminar escribiendo en una de las páginas iniciales tras haber hecho un largo recorrido para llegar a este punto, y por eso quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que he tenido el privilegio de conocer durante mi estancia en la universidad, en especial al profesor José M., ya que cada experiencia al lado de ellas ha sido un aprendizaje continuo que me ha permitido y servido de inspiración para lograr comprender y realizar este trabajo. También me gustaría agradecer a mi familia, en especial a mi hermana gemela Mónica, quien me ha apoyado desde el primer latido.

Finalmente, agradezco a Marc por haber compartido conmigo cada momento de frustración y alegría en esta aventura llamada Grado en Ingeniería Civil.

Gracias por ser mi mayor apoyo y además mi compañero de vida.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS	12
3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	13
3.1. Hormigón reforzado con fibras (HRF)	13
3.1.1. Propiedades mecánicas de las fibras	13
3.1.2. Fibras de acero	14
3.1.3. Fibras poliméricas – sintéticas	15
3.1.4. Otras fibras orgánicas- naturales	16
3.1.5. Interacción entre prestaciones mecánicas del hormigón y fibras	16
3.2. Hormigón con adiciones expansivas	17
3.2.1. Composición de HRF con adiciones expansivas.....	17
3.2.2. Pretensado químico	17
4. ESTADO DEL ARTE	18
4.1. Introducción	18
4.2. Artículos recientes de Agentes expansivos en hormigones y HRF	18
4.3. Estudios del comportamiento mecánico del HRF	25
4.4. Conclusión	29
5. PROYECTO PRECEDENTE	30
5.1. Introducción	30
5.2. Campaña experimental I	31
5.2.1. Planteamiento	31
5.2.2. Procedimiento de elaboración de las probetas de hormigón con CaO	31
5.2.3. Ensayos realizados hormigón-CaO	33
5.3. Campaña experimental II	35
5.3.1. Elaboración del hormigón reforzado con fibras (HRF).....	35
5.3.2. Ensayo BCN – doble punzonamiento	36
6. ANÁLISIS	37
6.1. Comportamiento del HRF	37
6.1.1. Tipo de fibra	37
6.1.2. Forma de la fibra	38
6.1.3. Adherencia fibra-matriz	41
6.1.4. Interacción fibra-matriz.....	43
6.1.5. Orientación y concentración de la fibra	44
6.1.6. Maneras de mejorar el HRF	45
6.2. Factores influyentes en la expansión	46

6.2.1.	Contenido de cal y tipo de cemento	46
6.2.2.	Relación a/c	46
6.2.3.	Granulometría.....	46
6.2.4.	Coacción de la expansión.....	47
6.2.5.	Curado.....	47
6.2.6.	Temperatura	47
6.3.	Efecto expansivo del CaO en el hormigón.....	47
6.3.1.	Modelización de la expansión	47
6.3.2.	Ecuación analítica	50
6.3.3.	Factor de amortiguamiento.....	52
6.4.	Efecto de la precompresión sobre el HRF	56
6.4.1.	Resistencia residual del HRF con o sin CaO.....	57
7.	CONCLUSIÓN.....	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Recopilación de propiedades mecánicas de fibras de uso común en materiales de hormigón. (Pujadas P. , 2016).....	14
Figura 3.2. Tipos de fibra metálicas. (Pujadas P. , 2016).....	14
Figura 3.3. Esquema del comportamiento de una fibra que atraviesa una fisura	16
Figura 3.4. Piedra caliza (Areaciencias, s.f.)	17
Figura 4.1. Viga de hormigón con plástico reforzado con fibra de carbono (PRFC) como refuerzo. (Wyrzykowski, Terrasi, & Pietro , 2020).....	19
Figura 4.2 Desarrollo de deformaciones del hormigón cuando las fluctuaciones volumétricas son limitadas. (Gagné, 2016)	20
Figura 4.3. Observaciones SEM con el mismo aumento de la interfaz fibra-matriz para las mezclas: (a) Flex, (b) Flex + EA, (c) Hook, (d) Hook + EA. (Corinaldesi V. I., 2015)	23
Figura 4.4. Fibra de polipropileno multifilamento	25
Figura 4.5. Curvas tensión - apertura de fisura en ensayos de flexión (EN14651) (Vivas, 2020).....	26
Figura 5.1. Proceso de fabricación de las probetas.....	33
Figura 5.2. Esquema de planteamiento de la 2da parte de la campaña experimental (Montero, 2021).....	35
Figura 5.3. Ensayo BCN con probeta de hormigón MF 0,50. (Montero, 2021)	36
Figura 6.1. Representación de las fibras cosiendo el hormigón	38
Figura 6.2. Comportamiento cualitativo de fibra conformada y sin conformar, a igualdad de otros parámetros principales	38
Figura 6.3. Presentación cualitativa de la eficiencia de la adherencia con el perímetro para diferentes soluciones. (Aguado, 2006)	40
Figura 6.4. Modelo de deformación en una matriz aplicando un esfuerzo de tracción. (Mármol, 2010).....	41
Figura 6.5. Tipos de Perfiles esfuerzo-posición cuando la longitud de la fibra l es (a) igual a la longitud crítica, (b) mayor que la longitud crítica y (c) menor que la longitud crítica en un compuesto reforzado con fibra y sometido a un esfuerzo de tracción igual a la resistencia a la tracción f_t de la fibra. (Mármol, 2010).....	42
Figura 6.6. Esquema de la zona de interacción interfacial (ITZ) alrededor de una fibra (Cornejo, 2014).....	42
Figura 6.7. Representación de la orientación y distribución de las fibras.	44
Figura 6.8. Efecto de la orientación de las fibras al aplicar tensión	45
Figura 6.9. Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras (40mm de longitud) (Hannant, 1978)	47
Figura 6.10. Curvas de expansión libre para diferentes tipos de dosificaciones ensayadas (Montero, 2021).....	48
Figura 6.11. Curva de deformación de las dosificaciones ensayadas hasta los 14 días (Montero, 2021).....	49
Figura 6.12. Curva del comportamiento del factor f obtenida por el ensayo de expansión hasta las 24h.	54
Figura 6.13. Curva del comportamiento del factor f obtenida por el ensayo de expansión hasta las 24h.	54
Figura 6.14. Efecto del valor del parámetro f sobre la tasa de expansión (Tixier & Mobasher, 2003).....	55
Figura 6.15. Curva del factor f obtenida a partir del ensayo de reloj comparador hasta los 14 días.	56

Figura 6.16. Representación de curva típica de carga vs desplazamiento vertical para el Ensayo BCN (desplazamiento de apertura circunferencial total o TCOD) (Pujadas P. , 2021).....	56
Figura 6.17. Resistencia residual vs desplazamiento vertical para HRF con distinto contenido de fibras y con CaO 20%	58
Figura 6.18. Resistencia residual vs desplazamiento vertical para HRF con distinto contenido de fibras sin CaO	58
Figura 6.19. Resistencia a tracción de hormigón con fibras y sin fibras (Pujadas P. , 2021).....	60
Figura 7.1. Resumen de las probetas ensayadas y analizadas.	61
Figura 7.2. Factor de amortiguamiento en función del tiempo.	61
Figura 7.3. Comparación de resistencia residual de un HRF con CaO (MFC) y sin CaO (MFSC).....	62
Figura 7.4. Superposición de hormigón convencional, fibras y pérdida de adherencia .	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Rango de proporciones de componentes para un SFRC. (ACI, 544, 1R-96, 1996).....	17
Tabla 4.1- Valoración de la trabajabilidad de las amasadas (Muñoz, 2011) Nivel de puntuación ascendente considerando que 0 = dificultad baja a 3= dificultad muy alta (puesta en obra inviable).....	25
Tabla 5.1. Tipo de mezclas empleadas para la campaña experimental (Montero, 2021).....	31
Tabla 5.2. Descripción de los ensayos realizados, cantidad y características de las probetas aplicadas en cada ensayo. (Montero, 2021)	32
Tabla 5.3. Densidad de los materiales utilizados y dosificación de partida para el HRP con contenido de cal (Montero, 2021).....	32
Tabla 5.4. Dosificación de probetas para la fabricación de hormigón reforzado pretensado (HRP). (Montero, 2021)	33
Tabla 5.5. Ensayos realizados para las probetas de hormigón con diferentes dosificaciones de CaO	34
Tabla 5.6. Ensayos realizados para encontrar el porcentaje óptimo de expansión.....	35
Tabla 5.7. Material empleado para hacer el HRF y material que se utilizó para ser confinado.	36
Tabla 5.8 Dosificación HRP	36
Tabla 6.1. Dimensiones y perímetro de diversas secciones para un área de 1 mm ² (Aguado, 2006).....	39
Tabla 6.2. Valores de expansión de cada una de las dosificaciones propuestas a diferentes edades. (Montero, 2021)	50
Tabla 6.3. Propiedades del CaO y Ca(OH) ₂	50
Tabla 6.4. Resultados de la expansión teórica a partir de la ecuación () y resultados reales del ensayo reloj comparador (Montero, 2021)	51
Tabla 6.5. Datos en la expansión real y teórica del trabajo de Montero.	53
Tabla 6.6. Valores del factor f obtenidos a partir de los datos del ensayo de expansión durante 24 horas.	53
Tabla 6.7. Valores del factor f de 0 a 14 días obtenidos a partir de los datos del reloj comparador.	54
Tabla 6.8. Valores de fctRx para los puntos de desplazamiento vertical de las muestras de HRF ensayadas	58

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el hormigón armado convencional conlleva una serie de problemas como el agrietamiento ante la intrusión de agua y sal, además de otros tipos de ataques al que se ve expuesto, esto deriva en el desgaste del mortero y en la corrosión de la armadura. Este proceso hace que la vida útil del hormigón se reduzca.

El agrietamiento del hormigón se produce cuando la resistencia a tracción del hormigón es menor que la tensión de tracción causada por factores del exterior. Compensar la contracción a través de la generación de etringita, produce una disminución en la tensión superficial.

Para combatir este tipo de problemas surge el HRF.

Se entiende como hormigón reforzado con fibras cuando en la mezcla del concreto se añade una cantidad de fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Este tipo de hormigón con fibras se pueden aplicar para soleras si las fibras son de acero, pavimentos donde se pueden separar más las juntas o llegar a eliminarlas, reducir el espesor y prolongar la vida útil debido a que el HRF puede superar de cinco a ocho veces si lo comparamos con el espesor de los pavimentos tradicionales.

El hormigón reforzado con fibras aporta una amplia gama de beneficios.

Al realizar una mezcla distribuida con la masa del concreto y las fibras de acero, el volumen del hormigón se ve reforzado además la durabilidad aumenta, ya que los filamentos de acero consiguen controlar la fisuración y previenen que se propaguen las grietas.

Al tener una buena distribución de las fibras, estas también se encuentran bien integradas a la mezcla conllevando una prevención de la oxidación.

La resistencia a flexo-tracción, impactos y esfuerzos se incrementa de una manera significativa comparada con el hormigón convencional.

Se logra una reducción del peso debido a que los filamentos pueden llegar a evitar el uso de la armadura o la malla de acero, además su aplicación se vuelve más sencilla y el precio es menor.

El hormigón no resiste los esfuerzos a tracción, conllevando esto a reforzar con estructuras de acero o mallados de acero. Al utilizar metal, se ha de proteger de la corrosión con gran cantidad de hormigón y en consecuencia obteniendo piezas de gran espesor y un alto consumo de material. Al consumir una cantidad elevada de barras acero el precio se incrementa considerablemente

Sí se incorpora fibras al hormigón se consigue una mejora en la resistencia a tracción, además de piezas con menor grosor y más económicas.

Reparación y habilitación de la estructura del hormigón debido a su alta relación resistencia peso y una mejor resistencia ante la corrosión. Reacondicionamiento de columnas de hormigón existentes mediante la adición de agentes expansivos que actúan sobre el FRP (hormigón reforzado con fibras poliméricas)

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo de final de grado es realizar un estudio teórico sobre el efecto del pretensado químico con el agente expansivo óxido de calcio (CaO) en un hormigón con fibras. Al ser un trabajo teórico los datos para el análisis del comportamiento del hormigón se han extraído del trabajo realizado por Montero. (Montero, 2021)

En su trabajo de máster, Montero realizó pruebas de varios tipos de hormigones, la primera fue con un hormigón de referencia y otro con diferentes tipos de adiciones de óxido de calcio (1%, 5%, 10%, 15%, 20% y 30% sobre el peso de cemento).

Esta primera fase la realizó con el objetivo de encontrar la dosificación óptima de cal para luego aplicarla a las mezclas de la segunda fase donde se quería encontrar el porcentaje óptimo de fibras. Las mezclas a ensayar fueron de hormigón con diferentes cantidades de fibras añadidas (25%, 50% y 75% sobre el volumen del hormigón).

Con los resultados de las muestras ensayadas se pretende analizar los siguientes puntos:

- Comportamiento del HRF según el tipo de fibra y sus características y maneras de cómo mejorarlo.
- Factores que influyen en el proceso de expansión y cómo afectan al comportamiento del hormigón
- Modelización del proceso de expansión y analizarlo según la ecuación analítica que se dispone en el proyecto antecedente, obtener valores para el factor f (amortiguamiento) y compararlos con los de la literatura.
- Análisis de la influencia de la expansión en el comportamiento del HRF con modelos teóricos, y estudiar cómo la compresión generada por la expansión en un sistema confinado puede mejorar el comportamiento del HRF.

3. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

3.1. Hormigón reforzado con fibras (HRF)

El hormigón reforzado con fibras está compuesto de cementos hidráulicos, áridos finos, o finos y gruesos, agua y fibras discretas discontinuas.

Las fibras son elementos de longitud corta y sección pequeña que se agregan a la masa del hormigón con el fin de otorgarle determinadas propiedades específicas.

Se encuentran en elementos de hormigón estructural o no estructural en los que la matriz del hormigón proporciona resistencia a compresión y protección de las fibras, mientras que la función de las fibras es proporcionar resistencia a la tracción y dar ductilidad después de la fisuración.

Los hormigones reforzados con fibras (HRF), se especifican como un tipo de hormigón que incluye en su composición fibras cortas, discretas y con una distribución aleatoria en su masa.

La aplicación de este tipo de hormigón reforzado puede ser tanto con objetivo estructural o no. Cuando se emplea este hormigón con fibras es con finalidad estructural, al realizar los cálculos relativos a alguno de los estados límites últimos o de servicio se puede obtener un resultado donde implica la posibilidad de poder substituir parcial o totalmente la armadura en algunas aplicaciones.

Para considerar un uso no estructural se debe incluir otros objetivos como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración.

Las fibras estructurales proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa. Se considera no estructural a aquellas fibras que suponen una mejoría ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión e impacto, y otros.

A continuación, se clasifican las fibras según su naturaleza.

- Fibras de acero
- Fibras poliméricas
- Otras fibras inorgánicas

3.1.1. Propiedades mecánicas de las fibras

Para lograr una respuesta efectiva de trabajo se recomienda que tengan una elevada resistencia a tracción, adherencia del mismo orden o incluso superior a la resistencia a tracción de dicha matriz, módulo elástico mayor que el correspondiente a la matriz (por lo menos 3 veces superior), coeficiente de Poisson y coeficiente de dilatación térmica semejantes al de la matriz.

TIPO DE FIBRA	DIÁMETRO EQUIVALENTE (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	ALARGAMIENTO DE ROTURA (%)
Acrílico	0,02-0,35	1100	200-400	2	1,1
Asbesto	0,0015-0,02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0,2-0,6	1500	400-700	4,8	3-10
Vidrio	0,005-0,15	2500	1000-2600	70-80	1,5-3,5
Grafito	0,008-0,009	1900	1000-2600	230-415	0,5-1
Aramida	0,01	1450	3500-3600	65-133	2,1-4
Nylon	0,02-0,4	1100	760-820	4,1	16-20
Poliéster	0,02-0,4	1400	720-860	8,3	11-13
Polipropileno (PP)	0,02-1	900-950	200-760	3,5-15	5-25
Polivinil alcohol (PVA)	0,027-0,660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1,4-1,8
Rayón	0,02-0,38	1500	400-600	6,9	10-25
Basalto	0,0106	2593	990	7,6	2,56
Polietileno	0,025-1	960	200-300	5,0	3
Sisal	0,08-0,3	760-1100	228-800	11-27	2,1-4,2
Coco	0,11-0,53	680-1020	108-250	2,5-4,5	14-41
Yute	0,1-0,2	1030	250-350	26-32	1,5-1,9
Acero	0,15-1	7840	345-3000	200	4-10

Figura 3.1 Recopilación de propiedades mecánicas de fibras de uso común en materiales de hormigón. (Pujadas P. , 2016)

3.1.2. Fibras de acero

Se trata de pequeños filamentos de acero de alta resistencia con variaciones en la forma como por ejemplo con una minúscula dobladura en cada punta o una ondulación en forma de onda a lo largo de su longitud. Su fabricación se hace a partir de un alambre al bajo carbono estirado en frío.

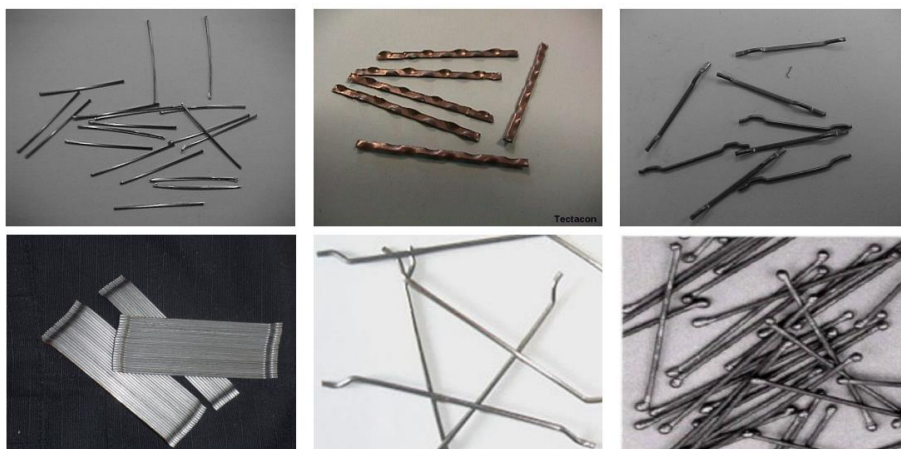


Figura 3.2. Tipos de fibra metálicas. (Pujadas P. , 2016)

Dichas fibras se emplean como elemento para el refuerzo secundario de estructuras de hormigón y mortero, incorporando un número elevado por cada kilogramo de concreto. La distribución ha de ser homogénea y uniforme, consiguiendo un comportamiento mecánico igual en toda la estructura.

Este aditivo brinda un mejor comportamiento ante el agrietamiento durante el asentamiento plástico del concreto y también en la fase de endurecimiento del concreto. Los beneficios de uso de las fibras de acero son los siguientes:

- Mejorar la adherencia de la fibra dentro del concreto.
- Otorgan una alta resistencia a la tracción.
- Incrementa la resistencia al agrietamiento por contracción plástica y asentamiento.

- Se crea un refuerzo uniforme y unidireccional para el concreto.
- La resistencia al corte aumenta.
- El diámetro equivalente y la deformación continua y esto causa un esfuerzo superior consiguiendo unas juntas y grietas más resistentes.

Las aplicaciones de estas fibras van encabezadas a elementos que han de soportar cargas considerables como por ejemplo en naves industriales, fábricas, bodegas, cubiertas para puentes, losa-cero, pistas de aeropuertos, etc.

3.1.3. Fibras poliméricas – sintéticas

Según el ACI 302R, las fibras sintéticas solamente ofrecen control de agrietamiento durante el asentamiento plástico del concreto, por lo que el uso de este tipo de fibras se ve limitado a la utilización en pisos en las que no actuarán cargas considerables.

Estas fibras se fabrican a partir de materiales sintéticos como el nylon, poliéster, polietileno y polipropileno, su sección es pequeña y se distribuyen de manera aleatoria en la mezcla del concreto. Tienen una resistencia al medio alcalino del concreto a largo plazo y ayudan a disminuir las fisuras generadas debido a la retracción plástica que se crea por los choques térmicos o cambios bruscos de temperatura durante secado del hormigón.

Se clasifican por su tamaño:

- Fibra polipropileno: monofilamento, no fibrilada, tiene orientación y su perfil permite anclarla a la matriz cementicia.
- Fibra de nylon: la principal característica es su habilidad para absorber agua, esta contribuye a la adherencia a la matriz del concreto.
- Macrofibras estructurales: pueden ser de tamaño pequeño y grueso, se usan para proveer una resistencia equivalente post-agrietamiento al refuerzo convencional.

En cuanto a los beneficios, existe un estricto control de calidad de las materias primas, dichos materiales requieren de un proceso de producción monitoreado con la tecnología más moderna. Disminuye la aparición de fisuras producidas por la retracción plástica ya que actúa como refuerzo tridimensional y esto ayuda a distribuir los esfuerzos de tensión en el elemento.

Además, da soporte y cohesividad al concreto en las superficies escarpadas o inclinadas (hormigón proyectado), e incrementa la resistencia al impacto del hormigón y la resistencia a la fatiga.

El uso y aplicación se encuentra en los sitios donde se requiera reducir las fisuras, especialmente en tanques, piscina, plantas industriales, almacenes, bodegas o gimnasios, además de elementos prefabricados.

Cabe destacar que este tipo de fibras no es un sustituto del refuerzo convencional estructural, tampoco previene las fisuras debidas a fuerzas externas.

Fibras de vidrio

Este tipo de fibras se emplean formando conjuntos de filamentos o cordones. Aportan una resistencia alta a tracción y un tiene buen módulo de elasticidad. Hay que tener especial cuidado ya que las fibras de vidrio son atacadas por los álcalis de los cementos portland.

3.1.4. Otras fibras orgánicas- naturales

Las fibras orgánicas que se pueden emplear pueden ser el cabello, henos, caña de azúcar, coco, sisal (proveniente del agave) o plátano. Al ser fibras naturales el coste del hormigón reforzado es bastante bajo.

La principal desventaja de este tipo de fibras es que puede descomponerse dentro de la masa del concreto si no se consigue un buen aislamiento de la atmosfera, o si se añade una cantidad excesiva de fibras orgánicas, esto puede llegar a debilitar el hormigón y reducir sus características.

En cuanto a las fibras naturales, se conoce como fibras de basalto a las microfibras naturales provenientes del basalto que se obtiene de la fusión de roca volcánica basáltica. Es una roca básica con bajo contenido en SiO_2 y de color oscuro. Este tipo de fibra es ecológicamente segura, no es tóxica, opta de una alta estabilidad térmica además de características aislantes y su estructura es elástica.

La principal característica que las concierne son la de limitar la fisuración por contracción en el concreto durante el fraguado.

Se suelen emplear en adoquinados, pavimentos industriales, pavimentos arquitectónicos y drenajes, elementos prefabricados, etc.

3.1.5. Interacción entre prestaciones mecánicas del hormigón y fibras

Seguidamente se detallarán los diferentes modos de rotura que se producen en el hormigón con fibras.

Hipótesis de partida

Como se muestra en la figura 1, hay una fibra de acero que atraviesa un plano de fisura perpendicularmente con el hormigón. Esta fibra está absorbiendo la fuerza de tracción T . al entrar en contacto la fibra con el hormigón se producirán tensiones tangenciales (t). (Aguado, 2006)

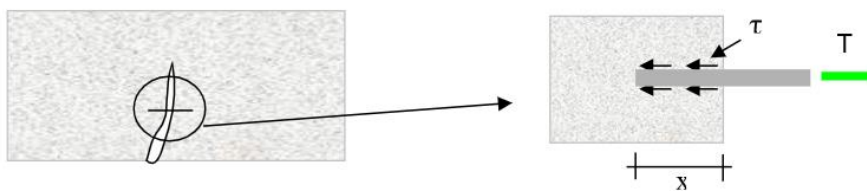


Figura 3.3. Esquema del comportamiento de una fibra que atraviesa una fisura

Al analizar la ecuación de equilibrio se encuentra que:

$$T = \tau \cdot \text{perímetro} \cdot x = \tau \cdot \pi\Phi \cdot x \text{ (si la sección fuese circular)} \quad (1)$$

Siendo:

Φ : diámetro de la sección transversal de la fibra

X: longitud de anclaje de la fibra en la masa del hormigón

3.2. Hormigón con adiciones expansivas

3.2.1. Composición de HRF con adiciones expansivas

En la tabla ___ se resume los principales componentes de un hormigón reforzado con fibras con un pretensado químico a base de óxido de calcio. Como aditivo, se menciona el plastificante ya que la cantidad de fibras puede reducir la trabajabilidad de la masa y este permite aumentar la fluidez.

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo del árido (mm)		
	10	20	40
Cemento (Kg/m3)	350-600	300-530	280-415
Agua-Cemento	0,35 - 0,45	0,35 – 0,50	0,35 – 0,55
% árido fino-grueso	45 – 60	45 – 55	40 – 55
%árido ocluido	4 – 8	4 – 6	4 – 5
Fibras conformadas (V_f %)	0,4 – 1,0	0,3 – 0,8	0,2 – 0,7
Fibras planas (V_f %)	0,8 – 2,0	0,6 – 1,6	0,4 – 1,4

Tabla 3.1. Rango de proporciones de componentes para un SFRC. (ACI, 544, 1R-96, 1996)

3.2.2. Pretensado químico

En este estudio se analiza la adición de óxido de calcio y su comportamiento como agente expansivo en el hormigón.

El CaO se expande al entrar en contacto con agua, y esto provoca una tracción interior que se denomina pretensado químico.

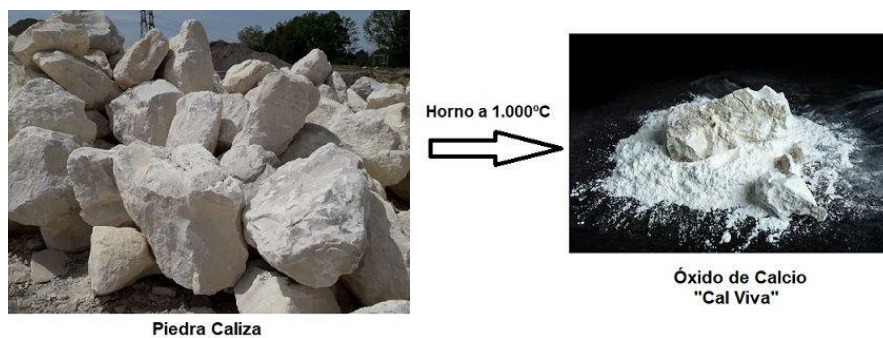


Figura 3.4. Piedra caliza (Areacencias, s.f.)

El óxido de calcio también llamado como cal viva, es un producto que se obtiene calcinando piedra caliza de hornos de cal, estas piedras son calentadas a una temperatura de 1000°C. El producto que se obtiene de la calcinación es el óxido de calcio que pasa por un proceso de trituración y se ira moliendo dependiendo del grosor requerido para su venta.

Al reaccionar el óxido de calcio con el agua se produce hidróxido de calcio y calor, lo que se conoce como reacción exotérmica, además de la expansión. (Mendoza W. , 2016)

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. Introducción

En esta sección se resumirán los estudios y artículos más avanzados relevantes para el proyecto. Se presentarán todos los desarrollos de última tecnología relacionados con el hormigón reforzado con fibras y los aditivos expansivos.

En este punto se explicarán los últimos desarrollos y proyectos relacionados con el proyecto mientras en el punto 3 se explica la base teórica.

4.2. Artículos recientes de Agentes expansivos en hormigones y HRF

Algunos trabajos han estudiado el efecto combinado de las adiciones expansivas y el hormigón reforzado.

Como explica Wei et al (Sun, 2001). El desprendimiento de fibra es una de las principales causas de falla en el hormigón reforzado.

Los últimos estudios expresan que la adicción de aditivos expansivos al hormigón reforzado mejora la unión entre las fibras y el hormigón. (Lin, 2022) (Pan, 2020), (Li, 2019)

Por ejemplo, el resultado de este proyecto (Lin, 2022) demuestra que la combinación de fibras de vidrio y aditivos expansivos se mejoran los índices entre un 65 y un 155%, en cambio si solo aplicamos las fibras la mejora es solo entre un 39 y un 76% y si solo añadimos los aditivos la mejora es del 5 al 34%. En este proyecto se encontró que el porcentaje óptimo de adicción era del 3 al 6%.

Otros estudios recientes exponen el comportamiento general del hormigón reforzado con fibras con aditivo expansivo.

Por ejemplo, en el proyecto de Pan (Pan, 2020), se explica que la expansión provocada por las reacciones químicas del agente expansivo induciría un pretensado químico, que luego proporcionaría tensiones de confinamiento al hormigón que rodea la barra de acero para mejorar la adherencia.

Sahamitmongkol y Kishi (Mo, 2014) demostraron que, debido al efecto de pretensado químico, un hormigón expansivo puede desarrollar una mayor tensión de adherencia local cerca de las grietas y, por lo tanto, tiene una mayor rigidez a la tensión en comparación con el hormigón ordinario.

Mo et al. (Mo, 2014) defendió después de extensos estudios que, con un diseño cuidadoso, se puede considerar que un hormigón expansivo se puede utilizar en la región restringida de una estructura de hormigón armado para funcionar como una estructura de hormigón pretensado.

Algunos artículos recién publicados en 2022 (Chu, 2022) y (Khan, 2022) apuntan en la misma manera que la unión entre fibras y hormigón mejora substancialmente con la adición de agentes expansivos. Por ejemplo, en el artículo (Chu, 2022) se explica que la adición expansiva entre 0 y 3% mejoraba las características mecánicas del material.

Hormigones pretensados químicamente con fibras

El estudio realizado por los científicos Giovanni Terrasi, Pietro Lura y Mateusz Wyrzykowski de la empresa (empresa que investiga materiales y tecnologías de vanguardia para un futuro sostenible), explica que, con la utilización de una nueva fórmula en el hormigón, se ha logrado crear elementos de hormigón auto pretensado. Este nuevo concreto permite la construcción de estructuras más esbeltas, donde se convierten en más rentables debido a que se produce un ahorro significativo de material y tiempo. (Wyrzykowski, Terrasi, & Pietro , 2020)

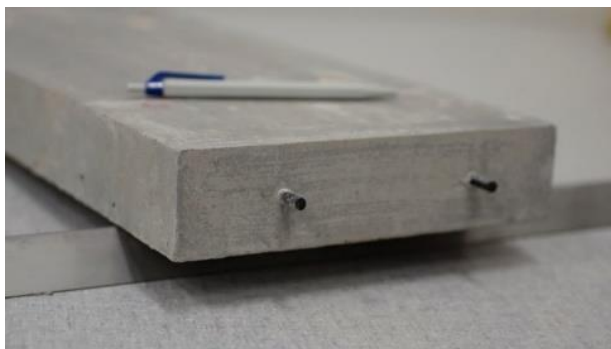


Figura 4.1. Viga de hormigón con plástico reforzado con fibra de carbono (PRFC) como refuerzo. (Wyrzykowski, Terrasi, & Pietro , 2020)

Tras haber estudiado las fibras como refuerzo las ventajas que proporcionan son la reducción del espesor, las estructuras de hormigón resultan más duraderas y además más estables.

En cuanto a los resultados, los niveles de pretensado que alcanzaron con la fórmula obtenida eran inferiores a los niveles del pretensado convencional, pero con los hormigones expansivos de altas prestaciones (high performance concrete, HPC) desarrollados por ellos, han conseguido niveles con capacidad de llegar a prescindir de las armaduras o refuerzos. Estos niveles tienen un alto grado de dilatación residual sin llegar a comprometer a la durabilidad de la estructura y, aun así, alcanzando prestaciones ideales para las propiedades mecánicas del hormigón. (Wyrzykowski, Terrasi, & Pietro , 2020).

Se combina el HPC expansivo con tendones hechos de revestidos de arena y además se presenta la combinación del HPC expansivo con tendones hechos de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) de módulo ultra alto (> 400 GPa).

Mediante la expansión del hormigón y su unión con los tendones revestidos de arena, podrían introducir tensiones de tracción de más de 600 MPa en los tendones (para una relación de refuerzo del 1%), correspondientes a más de 4 MPa de tensión de compresión (pretensado) en el hormigón. Los ensayos de flexión en 4 puntos mostraron que el pretensado químico aumentó el momento de fisuración de las vigas de hormigón esbeltas más de tres veces en comparación con el hormigón de referencia. Las pruebas a largo plazo de las deformaciones de los tendones mostraron que las pérdidas de pretensado debidas a la contracción y la fluencia por compresión son muy bajas. (Wyrzykowski, Terrasi, & Pietro , 2020)

Efectos de diferentes agentes expansivos en las propiedades de los materiales cementicios expansivos

Un artículo propuesto por Mahmood, muestra que la exposición en un ambiente no saturado por un sistema a base de cemento conduce a una contracción por secado debido a la evaporación del agua. La contracción es uno de los principales defectos del mortero y el hormigón, como también el alabeo, agrietamiento y la desunión ya que disminuyen la vida útil. (Mahmood, 2021).

Este estudio resumió todos los diferentes tipos de EA (expansive agent, EA) que se han utilizado en todo el mundo y se correlacionaron entre sí en función de los resultados previstos.

El cemento expansivo a base de MgO ha demostrado un mejor comportamiento y logrado compensar parcialmente las limitaciones de hidratación y expansión, usando una cantidad menor de agua que los demás. También la adición de aditivos externos como el agente reductor de contracción (SRA), fibra de acero, fibra híbrida, fibras de alcohol polivinílico (PVA), fibras de tereftalato de polietileno (PET), puzolanas, etc. Han mostrado mejores resultados en términos de resistencia del material, expansibilidad, durabilidad y fluidez. Los factores que afectan la expansibilidad de diferentes EA son la dosis, la condición de curado y la temperatura.

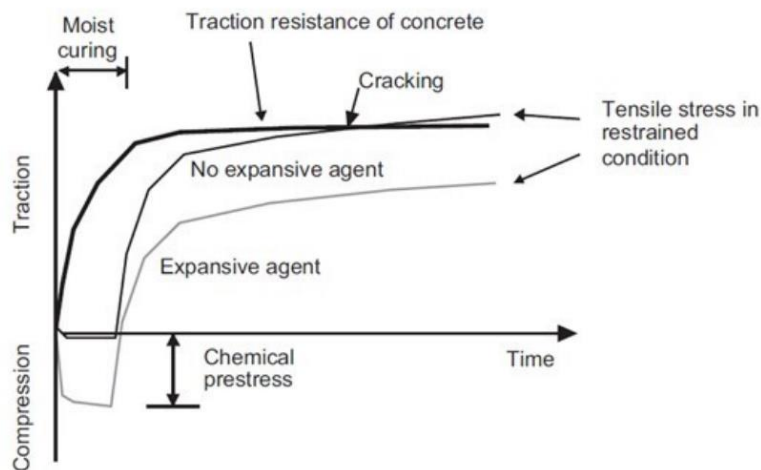


Figura 4.2 Desarrollo de deformaciones del hormigón cuando las fluctuaciones volumétricas son limitadas. (Gagné, 2016)

Agente expansivo de cal muerta (CaO) que producen cristales de portlandita (Ca(OH)₂) cuando entran en contacto con el agua.

Gagné R. (Gagné, 2016), presenta los aditivos desde un punto de vista teórico como práctico, una descripción fundamental del cemento Portland y los aglomerantes hidráulicos, así como aditivos químicos.

En uno de sus capítulos habla sobre los agentes expansivos, estos se utilizan para disminuir la contracción del concreto. Actualmente se utilizan dos tipos de materiales expansivos, uno a base de sulfoaluminato de calcio y otro a base de cal muerta. Como la dosificación de estos agentes expansivos suele ser bastante pequeña, se diluyen en cierta

cantidad de cemento Portland para mitigar el efecto de un error de dosificación. Cuando se utiliza un agente expansivo, es muy importante curar adecuadamente con agua el hormigón para lograr la expansión deseada. La expansión obtenida depende esencialmente de la dosificación del agente expansivo, pero también de la temperatura y de la eficacia del curado con agua.

El uso de agentes expansivos es muy simple y muy eficiente, siempre que se aplique un buen curado con agua sobre el hormigón y la temperatura no sea demasiado fría.

Se puede encontrar información más detallada en el link de la bibliografía.

Caracterización mecánica de compuestos diseñados a base de cemento preparados con fibras híbridas y agente expansivo

Un estudio realizado por Verónica Corinaldesi (Corinaldesi V. , 2016), muestra el comportamiento de mezclas de hormigón con fibras metálicas y poliméricas al añadir el agente expansivo óxido de calcio.

En este trabajo se analizaron quince compuestos a base de cementos modificados (Engineered Cement-based Composites, ECCs) a los que se les añadió agente expansivo de CaO.

En el primer estudio se observó la eficacia de tres dosis diferentes de agente expansivo sobre las propiedades mecánicas de los ECC reforzados con fibras metálicas amorfas en forma de cinta.

Después se prepararon 12 probetas de fibras metálica – polimérica, mezcladas para conseguir un refuerzo híbrido, con un peso de 40 Kg/m³ y las dosificaciones de 100–0%, 75–25%, 50–50%, 25–75% y 0–100 %. Fibras empleadas: tereftalato de polietileno (PET) en forma de gancho, polipropileno corrugado (PP) y fibras suaves de alcohol polivinílico (PVA).

La microestructura de las mezclas reforzadas con fibras metálicas se investigó mediante Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP). Los resultados obtenidos mostraron una resistencia a la flexión mejorada si se utilizan altas dosis de agente expansivo a base de CaO con fibras metálicas. La razón podría ser una mayor adherencia entre la fibra y la matriz a base de cemento, debido a su refinamiento de poros promovido por la adición del agente expansivo a base de CaO. Se buscó el porcentaje óptimo de combinación entre fibras metálicas y poliméricas, en términos de resistencia máxima y comportamiento dúctil post-fisuración.

En base a los resultados obtenidos de esta campaña experimental se extrajeron las siguientes conclusiones:

- El tipo de fibra utilizada no influyeron significativamente en la consistencia fresca ni en la resistencia a la compresión de los ECC
- El comportamiento a la flexión estuvo fuertemente influenciado por la adición del agente expansivo a base de CaO y por el sistema de fibras híbridas adoptado, tanto en términos de resistencia máxima como de tendencias posteriores al agrietamiento.

- La adición del agente expansivo en la dosis máxima demostró ser extremadamente eficaz para mejorar la calidad tanto de la matriz cementosa como de la ITZ (mejora de poros), lo que permitió obtener una mejora sobresaliente del comportamiento a la flexión
- El uso del sistema de fibras híbridas en presencia de CaO permitió lograr una mejora de la curva tensión-CMOD con respecto a la mezcla de referencia preparada con fibras metálicas sin agente expansivo

De acuerdo con el Código Modelo fib 2010, algunas mezclas ECC investigadas en este estudio, que casi muestran la ley constitutiva del plástico rígido, podrían permitir reemplazar parcialmente el refuerzo convencional por refuerzo de fibra, como para la tecnología UHPC (Ultra High Performance Concrete). Para algunas aplicaciones, en las que un miembro estructural se esfuerza más por flexión que por compresión (como vigas más que columnas), este tipo de material puede ser muy prometedor.

Además, en términos de durabilidad, un estudio anterior ya demostró la efectividad de la combinación de agente expansivo y fibras híbridas en términos de reducción de la resistencia a la contracción y permeabilidad. Además, todas las fibras utilizadas son extremadamente resistentes a los procesos de corrosión (excepto las fibras de PET, que sufren deterioro en ambiente alcalino), ya que el tipo de fibras metálicas utilizadas también contiene cromo en su aleación metálica, lo que garantiza una alta resistencia a la corrosión. (Corinaldesi V. , 2016)

La influencia del agente expansivo en el rendimiento de los HRF

Corinaldesi también realizó un estudio del comportamiento de hormigones reforzados con fibras (several fibre reinforced cement-based composites (FRCCs)) y hormigones de alto rendimiento (UHPC) en los que se agregó un agente expansivo a base de CaO para conseguir reducir el agrietamiento inducido por la retracción por secado.

Se testearon tres tipos de fibras metálicas diferentes, (fibras de aleación de acero planas y flexibles y fibras de acero rectas o en forma de gancho recubiertas de latón). Además, la microestructura de FRCC se investigó por medio de observaciones de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) y microscopio electrónico de barrido (SEM). Así como el efecto sobre el rendimiento mecánico de un pretratamiento térmico a 80 °C durante las primeras 24 h de curado después del vaciado.

Las conclusiones que se extrajeron de este estudio fueron las siguientes:

- La adición de un agente expansivo a base de CaO demostró ser eficaz para contrarrestar la retracción del hormigón (menos 50–60 % y menos de 30 % de contracción después de 28 días de exposición a 50 % de H.R. para FRCC y UHPC, respectivamente)
- El agente expansivo a base de CaO demostró ser extremadamente efectivo en términos de mejora de la resistencia a la flexión cuando se usa con fibras recubiertas de latón (+60 % de resistencia a la flexión después de solo 24 h en FRCC y +45 % de resistencia a la flexión después de 7 días en UHPC).

- La razón de esta sinergia entre el agente expansivo a base de CaO y las fibras de acero latonadas probablemente radica en la formación de cristales de calcio-hidroxi-cincato en la interfaz entre las fibras y la pasta de cemento circundante, este fenómeno es promovido por la descincificación del latón en ambiente alcalino (debido a la presencia de una gran cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formada cuando el CaO entra en contacto con el agua). Estos cristales de hidroxizincato, como se observa por SEM, probablemente pueden mejorar significativamente la calidad de la interfaz fibra-matriz al aumentar la adherencia.

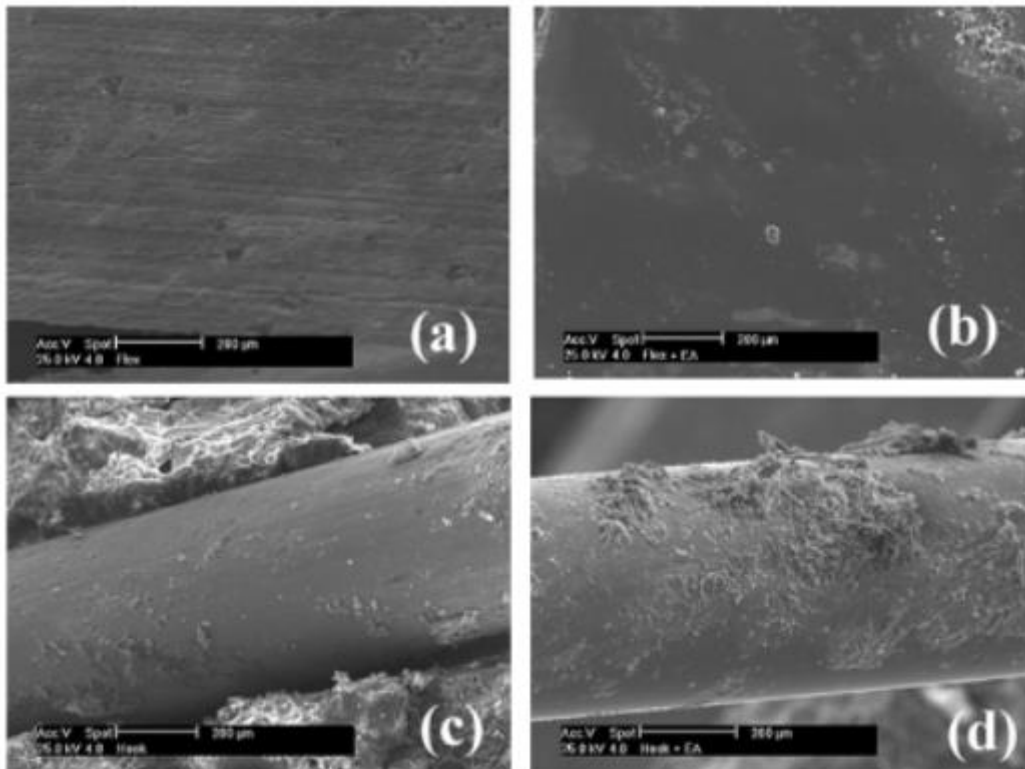


Figura 4.3. Observaciones SEM con el mismo aumento de la interfaz fibra-matriz para las mezclas: (a) Flex, (b) Flex + EA, (c) Hook, (d) Hook + EA. (Corinaldesi V. I., 2015)

- La adición de agente expansivo a base de CaO dejó prácticamente sin cambios los valores de resistencia a compresión de los hormigones. El pretratamiento térmico a 80 °C durante las primeras 24 h de curado tras la colada resultó no sólo inútil sino también perjudicial en algunos casos en términos de mayor porosidad de los FRCC y, en consecuencia, un menor rendimiento mecánico.

En conclusión, sobre la base de los resultados obtenidos en este trabajo, parece que la debilidad crucial del hormigón, como su baja resistencia a la flexión, su fragilidad, así como su tendencia a la contracción, puede mejorarse significativamente si se utiliza un agente expansivo a base de CaO. utilizado junto con un alto volumen de fibras recubiertas de latón, debido a su sinergia, que es capaz de mejorar la adhesión en la interfaz fibra-matriz. (Corinaldesi V. I., 2015)

Efecto de la combinación de dos agentes expansivos en el desempeño mecánico y durabilidad del hormigón

Un estudio dirigido por el profesor Zhong Lin Wang (Wang, 2021) del Instituto de Tecnología de Georgia Instituto de Nanoenergía y Nanosistemas de Beijing, China, analizó la influencia de la combinación de dos agentes expansivos (CaO y sulfoaluminato de calcio) sobre las resistencias a la compresión libre y limitada, la tasa de expansión limitada, la resistencia a la carbonatación, la resistencia a la penetración de iones de cloruro y la resistencia a la corrosión del hormigón armado. Las dosificaciones de agente expansivo fueron 0%, 3%, 6%, 9% y 12% sobre la cantidad total de materiales cementicios.

Se aplicaron dos tipos de mezclas minerales (escoria de alto horno y cenizas volantes). Los resultados muestran que la dosificación adecuada (inferior o igual al 9%) de agente de doble expansión (DEA) con una gran cantidad de aditivos minerales puede mejorar las resistencias a la compresión limitada y libre. Sin embargo, cuando la dosificación del DEA es superior al 9%, la adición del mismo conduce a la reducción de las resistencias a la compresión limitadas y libres.

La variación de la tasa de expansión límite alcanza el valor máximo cuando la edad de curación es de 14 días. La creciente adición de agentes expansivos y la menor relación agua-aglutinante demuestran un efecto positivo en la tasa de expansión limitada. El hormigón con un 60 % de aditivos minerales (cenizas volantes y escoria de alto horno granulada molida) muestra una tasa de expansión limitada más baja y una mayor resistencia a la compresión que el hormigón con un 50 % de aditivos minerales.

Las conclusiones resultantes fueron las siguientes:

- Las resistencias a la compresión limitadas y libres primero aumentaron y luego disminuyeron con la dosis creciente de DEA.
- El porcentaje de expansión limitada de las muestras con la adición de agentes expansivos aumentó primero y luego disminuyó con el aumento de la edad de curado. Cuando la edad de curado fue de 14 días, el coeficiente de expansión fue el más alto.
- La expansión con 60% de aditivos minerales (cenizas volantes y escoria de alto horno granulada molida) fue menor que la del concreto con 50% de aditivos minerales. Además, el hormigón con un 60% de aditivos minerales mostró mejores propiedades mecánicas.
- La incorporación de un agente de expansión doble logró mejorar la resistencia a la carbonatación, la penetración de iones de cloruro, la corrosión del acero y la resistencia mecánica (las resistencias a la compresión libre y limitada).
- La disminución de la relación agua-aglutinante condujo a una mejor resistencia a la compresión y resistencia a la carbonatación, penetración de iones de cloruro, corrosión del acero y una disminución de la tasa de expansión.

4.3. Estudios del comportamiento mecánico del HRF

Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de polipropileno multifilamento e influencia del porcentaje de fibra adicionado

En el año 2011, Fernando Muñoz Cebrián (Muñoz, 2011), realizó un estudio de la influencia de la incorporación de fibra de polipropileno multifilamento en hormigones de altas prestaciones y en las propiedades mecánicas de un hormigón endurecido. En dicho estudio se comparó un hormigón convencional con un hormigón con fibras. La cantidad de fibras adicionadas al hormigón variaba entre el 5% y el 20% en peso del cemento.

Las propiedades que fueron estudiadas fueron la resistencia a compresión y la resistencia a flexotracción.



Figura 4.4. Fibra de polipropileno multifilamento

Los resultados del estudio mostraron que a medida que se incrementaba la cantidad de fibra la trabajabilidad del hormigón disminuía (el hormigón en estado fresco). En la siguiente tabla se muestra la evolución de la trabajabilidad del hormigón a medida que se incrementa el porcentaje de fibras de polipropileno.

AMASADA	% FIBRAS (en peso cemento)	Nivel de Dificultad del amasado	Nivel de Dificultad conformación moldes
A000	0	0	0
A005	5	1	1
A010	10	1	2
A020	20	2	3
B000	0	0	0
B005	5	1	1
B010	10	2	2
B015	15	3*	3

Tabla 4.1- Valoración de la trabajabilidad de las amasadas (Muñoz, 2011)

Nivel de puntuación ascendente considerando que 0 = dificultad baja a 3= dificultad muy alta (puesta en obra inviable).

La pérdida de trabajabilidad presenta un cierto beneficio, ya que le otorga un aumento en la cohesión del hormigón. Este beneficio puede ser aplicado para obras particulares como hormigonado de taludes, vaciado de hormigón en alturas pequeñas, además de poder utilizarlo en hormigones proyectados.

Así mismo, se pudo observar que las fibras de polipropileno añadidas no tienen un efecto significativo en la resistencia a compresión de un hormigón endurecido, además de una disminución de la resistencia a flexotracción de este.

Influencia del tipo de fibra en la resistencia al impacto de HRF

El artículo escrito por Juan C. Vivas (Vivas, 2020), becario doctoral CONICET de la facultad de ingeniería UNLP-LEMIT (Argentina), estudia la influencia del tipo de fibra sobre la respuesta al impacto del HRF y a la vez explora la vinculación que existe entre los parámetros estáticos y dinámicos, también cómo los factores afectan al HRF.

En el estudio que realiza, analiza tres muestras de HRF con fibras de vidrio, acero y polipropileno con niveles similares de resistencia residual $fR1$, en flexión y también de compresión.

Sus estudios mostraron que, aun teniendo toda la resistencia similar para pequeñas aperturas de fisuras, la respuesta en estado fisurado frente a impactos variaba significativamente según el tipo de fibra.

El objetivo era evaluar la influencia de la fibra en la respuesta al impacto, caracterizar en términos de las energías acumuladas de fisuración (E_c), postfisuración (E_p) y total (E_t) de la apertura de fisura inicial (COD_c) y la velocidad de crecimiento del $COD(V_c)$.

En la figura 4.5. se muestra el comportamiento de los diferentes tipos de hormigones que fueron ensayos (hormigón de referencia R, fibras de acero A, fibras de vidrio V y fibras de polipropileno P) en el ensayo a flexión.

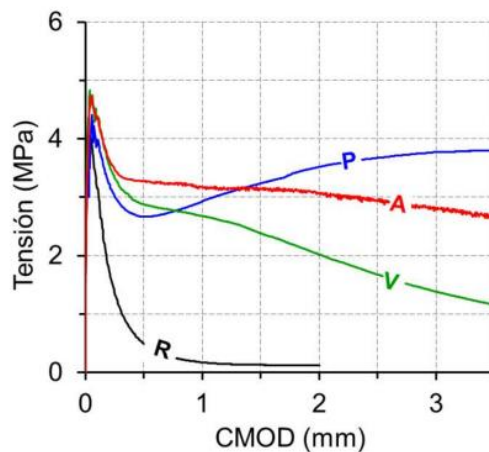


Figura 4.5. Curvas tensión - apertura de fisura en ensayos de flexión (EN14651) (Vivas, 2020)

Las conclusiones que extrajo de este ensayo fueron las siguientes:

- La influencia de las fibras ante sollicitaciones de impacto se manifiesta particularmente en estado fisurado
- La energía de fisuración no depende del tipo de fibra, pero la incorporación reduce la apertura de la fisura inicial.
- La respuesta ante impactos en estado de fisuración varía según el tipo de fibra aplicada en HRF. Las fibras poliméricas presentaron una mejor eficiencia.
- La respuesta de impacto de los HRF con fibras de acero y vidrio fue similar en término de energía postfisuración, por lo que la respuesta estática y dinámica de un hormigón no necesariamente se corresponden.

Estas conclusiones son válidas para los HRF estudiados, pero se necesitan más estudios para que las mismas puedan ser generalizadas.

Variaciones estadísticas de la resistencia al impacto del hormigón armado con fibras de polipropileno.

El profesor de Ingeniería Civil Atef Badr de la Universidad de Leeds, Londres, investigó la resistencia al impacto del hormigón reforzado con fibra de polipropileno (FRC) utilizando la prueba de impacto de caída de peso repetida recomendada por el Comité 544 de ACI. Los resultados se analizaron en base a un enfoque estadístico. Se examinó la variación de los resultados dentro del mismo lote y entre diferentes lotes. Los parámetros estadísticos se compararon con las variaciones notificadas en la resistencia al impacto de compuestos de hormigón reforzados con otros tipos de fibras, como fibras de carbono y acero. El análisis estadístico indicó que los resultados obtenidos de esta prueba tuvieron grandes variaciones y es necesario aumentar el número de repeticiones a por lo menos 40 ejemplares por mezcla de concreto para asegurar un error por debajo del 10%. Se concluye que esta prueba con sus procedimientos y recomendaciones actuales no debe ser considerada como una prueba de impacto confiable. Este estudio ha destacado la necesidad de modificar esta prueba de tal manera que aumente su precisión y reduzca la gran variación en los resultados. (Badr, 2006)

Para el PPFRC (Polypropylene fibre-reinforced concrete) utilizado en esta investigación, los resultados de resistencia al impacto indicaron una pobre correlación con la distribución normal, y se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La resistencia al impacto de PPFRC, según lo determinado a partir de la prueba de impacto de caída de peso repetida de ACI, tiene una desviación estándar y un coeficiente de variación grandes. Los coeficientes de variación observados fueron aproximadamente cuatro veces el valor recomendado para la resistencia a la compresión. Los valores fueron de aproximadamente 60% y 50% para la resistencia al primer agrietamiento y al último impacto, respectivamente.
- Si esta prueba se considera como una prueba estándar, es necesario aumentar el número de repeticiones a por lo menos 40 probetas por cada prueba o mezcla de concreto para asegurar un error por debajo del 10%. Sin embargo, esto no es práctico ni económico y va totalmente en contra de la intención de esta prueba, que es proporcionar una prueba de impacto fácil, simple y económica.
- Es crucial que esta prueba se modifique de tal manera que aumente la precisión y reduzca la gran variación de resultados. Alternativamente, se debe desarrollar una nueva técnica de prueba de concreto contra impacto. (Badr, 2006)

Comportamientos mecánicos y estructurales del hormigón reforzado con fibras de ultra altas prestaciones sometido a impacto y explosión

El profesor asociado Yoo DY, Banthia N, de la Universidad de Hanyang, Seoul y el profesor Nemkumar Banthia de la Universidad Columbia Británica, Canadá, realizaron una investigación exhaustiva de la resistencia al impacto y a las explosiones del hormigón reforzado con fibras de ultra alto rendimiento (UHPFRC) considerando varios factores influyentes.

Se empezó examinando en detalle el comportamiento de extracción de fibra dependiendo de la velocidad, el comportamiento de compresión dinámica y los comportamientos de tracción y flexión de impacto, y se discutieron los beneficios de usar UHPFRC para mejorar la resistencia al impacto del concreto ordinario.

Era evidente que el UHPFRC es capaz de disipar mucha más energía por impacto que el concreto ordinario con y sin fibras, el uso de la fibra de acero larga y recta es eficaz para mejorar la resistencia al impacto del UHPFRC en comparación con la del acero deformado con fibras en fracciones de gran volumen, la orientación de la fibra influye significativamente en la resistencia al impacto de UHPFRC: cuando se alinean más fibras en la dirección de la carga de tracción, se logra una mejor resistencia al impacto, y el efecto del tamaño en el factor de aumento dinámico frente a la deformación. relación de velocidad es insignificante. Las resistencias al impacto y a las explosiones de vigas, losas, columnas y estructuras compuestas de UHPFRC también se examinaron a nivel estructural y se extrajeron varias conclusiones útiles. El UHPFRC se prefiere para estructuras resistentes al impacto (o explosión) en comparación con el concreto ordinario debido a su mejor resistencia al impacto y explosión en dimensiones, configuración de refuerzo y magnitud de carga idénticas. El uso de barras de refuerzo de acero de alta resistencia proporciona la mejor resistencia a explosiones de las vigas o losas de UHPFRC en comparación con la de las barras de refuerzo de acero de resistencia normal, y los detalles sísmicos aplicados en las columnas de UHPFRC conducen a una mejor resistencia a las explosiones que la que se observa en las columnas sin detalles sísmicos. (Yoo, 2017)

A partir de la revisión y discusión de la literatura se llegó a las siguientes conclusiones.

- La resistencia en UHPFRC mejoró cuando aumentó la velocidad de deformación. Sin embargo, su sensibilidad a la velocidad de deformación fue menor que la de NSC y HSC con y sin fibras. UHPFRC pudo disipar mucha más energía durante el impacto y mostró un rendimiento residual mucho mejor después del daño por impacto en comparación con NSC y HSC que contienen acero o fibras poliméricas.
- La fibra de acero recta fue más efectiva para mejorar la fuerza de unión y la capacidad de disipación de energía que las fibras de acero deformadas (con ganchos y ondulada) en los impactos, ya que mostró mayor sensibilidad a la velocidad de deformación. Sin embargo, la fibra de acero ondulada fue más eficiente para mejorar la capacidad de disipación de energía a niveles cuasi estáticos y sísmicos. Una disminución en el diámetro aumentó la sensibilidad a la velocidad de las fibras de acero rectas en UHPC.
- Los comportamientos dinámicos de compresión, tracción y flexión mejoraron al agregar fibras de acero, y la efectividad aumentó cuando se incrementó la cantidad de fibras. Los usos híbridos de fibras de acero y PVA proporcionaron una mayor tenacidad bajo impactos de compresión repetidos que el uso de fibras de acero y basalto.
- En general, el uso de fibras de acero largas y rectas en UHPFRC mostró la mejor resistencia al impacto tanto a la tracción como a la flexión, incluida la resistencia posterior al agrietamiento y la capacidad de absorción de energía, en

comparación con el uso de fibras de acero deformadas (con ganchos y onduladas). Se observó que la orientación de las fibras es un factor fundamental ya que se obtuvo una mejor resistencia al impacto de UHPFRC en términos de resistencia a la flexión y tenacidad. La capacidad de deformación y la tenacidad a las cargas de impacto disminuyeron al aumentar el tamaño de la muestra.

- Los resultados predictivos de la relación entre el DIF de la resistencia a la tracción de UHPFRC y la velocidad de deformación fueron diferentes para diferentes tipos de modelos. Además, todavía no está claro si la resistencia a la tracción medida bajo impacto es la resistencia real de UHPFRC excluyendo el efecto de inercia.
- DIF: factor de aumento dinámico, es un número adimensional que describe las veces que las deflexiones o tensiones deben multiplicarse por las deflexiones o tensiones causadas por las cargas estáticas cuando se aplica una carga dinámica a una estructura.
- Las losas de UHPFRC no reforzadas exhibieron menos daño que las losas de NSC reforzadas bajo explosiones de campo lejano y explosiones de contacto. El uso combinado de UHPFRC con barras de refuerzo de acero de alta resistencia fue muy eficaz para mejorar la resistencia a las explosiones de las losas de hormigón. El aumento de la profundidad de la losa de UHPFRC redujo el daño por explosiones de contacto, pero la cantidad de varillas de acero no afectó significativamente el daño en términos de cráteres y desprendimiento.
- Se prefiere el uso de UHPFRC en columnas resistentes a explosiones en lugar de NSC y SCC porque soportó más de cuatro veces la fuerza para dimensiones idénticas y detalles de refuerzo.
- El uso adicional de barras de refuerzo de acero en el revestimiento de UHPFRC condujo a una mayor capacidad de carga y una mejor distribución de grietas debido al efecto de refuerzo de la tensión, y los miembros NSC postensados con revestimiento de UHPFRC exhibieron un modo de fractura más localizada pero una mayor capacidad de carga. (Yoo, 2017)

4.4. Conclusión

El estado del arte explica cómo las propiedades de hormigón con fibras y agentes expansivos mejoran las características de la mezcla, obteniendo un hormigón más resistente a tracción ya que para la resistencia a compresión sigue siendo igual, de todas maneras, cada estudio anteriormente explicado ha demostrado cada uno a su manera como las cualidades del concreto se ven afectadas tras añadir un porcentaje de cantidad de fibras, agentes expansivos o incluso una fusión híbrida, combinando diferentes tipos de fibras o diferentes tipos de agentes expansivos.

5. PROYECTO PRECEDENTE

5.1. Introducción

En este punto se pretende dar una explicación sobre la procedencia de los datos utilizados en el apartado 6.3 sobre el análisis experimental de la modelización de la expansión y estimación de la precompresión generada en función del contenido de CaO, y la modelización del efecto de la precompresión sobre las fibras y sobre el comportamiento residual (Ensayo Barcelona).

Cabe mencionar que este trabajo se ha elaborado a partir del proyecto de final máster de Domenica Montero, cuyo estudio se centró en el efecto que tiene las adiciones a base de óxido de calcio (CaO) como agente expansivo, para lograr un efecto de pretensado químico y evaluar la viabilidad técnica para su utilización como adición en la dosificación de elementos de hormigón reforzado con fibras.

En su proyecto empezó por la caracterización del material expansivo en varias muestras de hormigón, luego determinó el porcentaje de adición idónea, consiguiendo el contenido de cal para alcanzar los valores de expansión y tensión de confinamiento con los que conseguía generar las tensiones de precompresión sobre la estructura interna del hormigón, y así lograr disminuir la fisuración.

Para poder comprender los datos que se analizan en el punto número 6, se procede a explicar más detalladamente el trabajo de final de máster de Montero.

El proyecto precedente de este trabajo de final de grado está constituido por 6 capítulos, donde el primer capítulo consta de la introducción y objetivos del trabajo mencionados inicialmente.

En el capítulo 2 realiza una introducción al tema propuesto y una revisión general de la literatura más novedosa sobre los hormigones expansivos.

El capítulo 3 describe la campaña experimental que llevó a cabo y donde desarrolló el estudio. Este capítulo consta de dos partes, la primera donde se enfoca en caracterizar el material proponiendo dosificaciones con diferentes contenidos de adición de cal y realizando los ensayos para poder determinar las propiedades físico-mecánicas del material. Al ejecutar estos ensayos consigue medir la expansión y tensión confinada.

La segunda parte consiste en la descripción del procedimiento de fabricación de hormigones reforzados con fibras con la adición expansiva, donde también se realizan ensayos para la evolución del comportamiento conjunto.

Seguidamente en el capítulo 4, presenta los resultados obtenidos en los ensayos de la campaña experimental y realiza el ensayo Barcelona con las probetas obtenidas de HRF. En este apartado, analiza la influencia del contenido de cal añadido en el proceso de expansión y tensión para determinar el contenido de cal óptima. También analiza los resultados de resistencias residuales para las dosificaciones con diferentes contenidos de fibras.

En el capítulo 5 se presenta un modelo analítico de ajuste exponencial que permite crear las curvas de deformación teórica que obtiene en los cálculos teóricos junto con las curvas de deformación que obtuvo en los ensayos experimentales (capítulo 4).

Finalmente, en el capítulo 6 presenta las conclusiones extraídas del trabajo de final de máster y futuras líneas de investigación.

Debido a que este trabajo se basa en los datos obtenidos por Montero (Montero, 2021) en el capítulo 3, se realiza una explicación más concreta de este.

5.2. Campaña experimental I

5.2.1. Planteamiento

El objetivo de esta campaña era el estudio del comportamiento expansivo de adición de óxido de calcio en el hormigón.

Se llevaron a cabo una serie de ensayos para poder entender el comportamiento del material tomando como referencia a estudios preliminares (Fernández, 2017). El propósito de estos ensayos era la determinación de la influencia de la cal y la interacción de esta con el cemento, para ello se consideró como punto de partida una variable para la dosificación: porcentaje de CaO sobre el peso del cemento. Y además la hipótesis de que a mayor contenido de cal mayor será la expansión, es decir, el CaO influye directamente en el efecto de expansión que se genera en el hormigón, como se mencionó en el apartado número 3.2.2. Esta expansión se produce cuando el óxido de calcio se hidrata y eso provoca un aumento de volumen al formarse el Ca(OH)_2 . [12]

5.2.2. Procedimiento de elaboración de las probetas de hormigón con CaO

En la tabla número 5.1. se describen los 7 tipos de mezclas con diferente dosificación de cal utilizadas en los ensayos que se llevaron a cabo para cada una de estas mezclas. En la tabla 5.8. se describe cuantas probetas fueron utilizadas, el tipo de ensayo, las medidas de la probeta y a qué tiempo fueron ensayadas. (Montero, 2021)

TIPOS DE MEZCLAS						
HR	M1	M5	M10	M15	M20	M30
-	1%	5%	10%	15%	20%	30%

Tabla 5.1. Tipo de mezclas empleadas para la campaña experimental (Montero, 2021)

Ensayo	Nº de probetas	Nº probetas utilizadas	Dimensión (mm)	Tipo de probeta	Tiempo de ensayo desde la fabricación
Prueba expansión libre y tensión de confinamiento (experimental)	4 → 28	2/tipo de mezcla	160x50x40	Prismática	-
		2/tipo de mezcla			

Ensayo de flexión simple EN 12390-3:2009	3→21		160x50x40	Prismática	3 días
Ensayo compresión simple EN 12390-3:2009	3→21		50x40x40	Prismática	3 días
Ensayo de porosidad y densidad UNE-EN 1097-3:1999	9→63		50x40x40	Prismática	2,3 y 7 días

Tabla 5.2. Descripción de los ensayos realizados, cantidad y características de las probetas aplicadas en cada ensayo. (Montero, 2021)

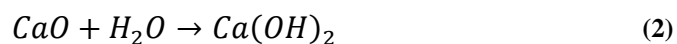
Los materiales que se usaron en este proyecto fue el cemento CEM IIA-L/42,5R, óxido de calcio como agente expansivo, árido grueso 4/12 y arena 0/4. Además de plastificante como aditivo por las propiedades polifuncionales del tipo MasterPozzolith 7003.

Material	Densidad (gr/mc3)	Contenido (Kg/m3)
cemento CEM IIA-L/42,5R	3,30	370
Arena 0/4	2,65	1250
Gravilla 4/12	2,65	430
Agua	1	4,8
Aditivo plastificante	1,10	215

Tabla 5.3. Densidad de los materiales utilizados y dosificación de partida para el HRP con contenido de cal (Montero, 2021)

Peso de cada material se calculó en base a un valor de referencia del cemento. Para el caso de la cal y el plastificante se calculó como porcentaje del peso del cemento, con la cal como variable y el aditivo plastificante en 1.3%. Además, para el cálculo del agua tuvo en cuenta el agua estequiometria necesaria para hidratar el óxido de calcio, la relación a/c y el agua que se incluye en el aditivo.

La cantidad de agua necesaria la calcula a través de las siguientes ecuaciones:



$$Agua (w)gr = \left[cemento \frac{a}{c} + (cal \cdot 0,32124) + arena \cdot \%Abs - (0,7 \cdot P) \right] \quad (3)$$

En la tabla 5.4. se muestra las dosificaciones para los diferentes porcentajes de contenido de CaO.

Material	Descripción	Cantidad (Kg/m ³)					
		HR	M 1%	M 5%	M 10%	M 15%	M 20%
Cemento	CEM IIA-L/42,5R	370,00	370,00	370,00	370,00	370,00	370,00
Cal	CaO	-	3,70	18,50	37,00	55,50	74,00
Arena	Arena 0/4	1248,75	1248,75	1248,75	1248,75	1248,75	1248,75
Gravilla	4/12'	416,25	416,25	416,25	416,25	416,25	416,25
Agua	-	214,93	215,25	216,54	218,15	219,75	221,36
Aditivo	Plastificante Master Pozzolith 7003	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81

Tabla 5.4. Dosificación de probetas para la fabricación de hormigón reforzado pretensado (HRP). (Montero, 2021)

En la figura 5.1. se explica cómo se llevó a cabo la metodología de fabricación para las cinco dosificaciones propuestas.

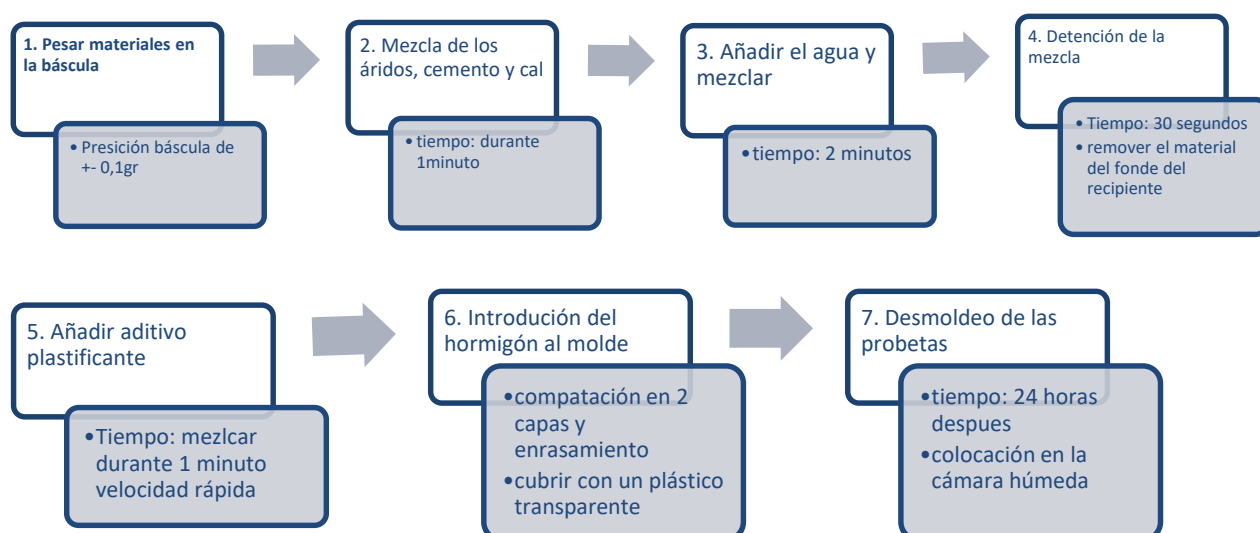


Figura 5.1. Proceso de fabricación de las probetas

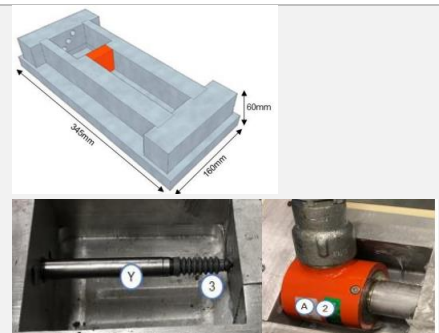
5.2.3. Ensayos realizados hormigón-CaO

A modo de resumen se procede a explicar los ensayos aplicados en el TFM de Montero en formato tabla, en el caso de que se necesite más detalles sobre algunos de los ensayos se puede encontrar su trabajo en la siguiente referencia (Montero, 2021), en el apartado de bibliografía.

En la siguiente tabla se describen los ensayos que se realizaron con el hormigón a edades tempranas.

**Ensayo expansión libre y tensión de confinamiento
UNE EN 196-1:2005 (AENOR, 2005)**

Medida de la expansión libre (expansión máxima que se puede alcanzar) y tensión de confinamiento mediante una probeta diseñada específicamente para estos fines. (A, es la célula que carga y B el elemento que mide)



Ensayo con reloj comparador



Mide la deformación del material de manera más precisa.

Medida en el proceso de expansión del hormigón
Se midió tras las primeras 24 horas de fabricación de las muestras y luego durante los siguientes 7 días.



Tabla 5.5. Ensayos realizados para las probetas de hormigón con diferentes dosificaciones de CaO

Al medir la expansión de las probetas, al llegar el hormigón a un estado endurecido procedió a aplicar ensayos para obtener las características del material.

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL EN ESTADO ENDURECIDO			
Ensayo	Objetivo	Detalles	Representación
Ensayo de flexión UNE EN 196-1 (AENOR, 2005)	Resistencia a flexión	Tiempo en la cámara humedad 3 días	
Ensayo de compresión simple UNE EN 196-1 AENOR, 2005	Resistencia característica	Mismas probetas del ensayo a flexión	
Ensayo de porosidad ASTM C 642-06 (ASTM,2006)	-peso seco -peso saturado -peso de inmersión - peso saturado con superficie seca	Realización: 2,3 y 7 días después de amasado	


Densidad ASTM C642-06 (ASTM, 2006)	-medidas probetas peso seco -densidad de la probeta	Mismas probetas del ensayo de porosidad	
---	--	--	---

Tabla 5.6. Ensayos realizados para encontrar el porcentaje óptimo de expansión.

5.3. Campaña experimental II

5.3.1. Elaboración del hormigón reforzado con fibras (HRF)

A través de los ensayos aplicados explicados anteriormente obtuvo el porcentaje de CaO óptimo, es decir, logró saber la cantidad necesaria para conseguir los niveles deseados de expansión y tensión confinada en el hormigón. Con estos resultados procedió a añadir las fibras en la dosificación para conseguir una tensión de precompresión en el material y así obteniendo un hormigón reforzado con fibras y además con un pretensado químico (HRP).

En la figura 5.2. se aprecia un esquema de lo que se realizó en la segunda parte de la campaña experimental y en las tablas 5.7. y 5.8. se detallada la elaboración del HRF (tipos de fibra, procedimiento, dosificación utilizada, etc.).

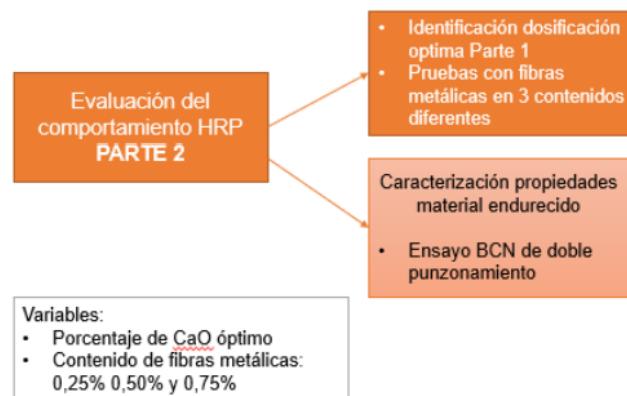



Figura 5.2. Esquema de planteamiento de la 2da parte de la campaña experimental (Montero, 2021)

Hormigón reforzado con fibras (HRF)		
Tipo de fibras	Metálicas RHOOK 35/0,75	
Características	Diámetro 0,75 mm Longitud 35mm Densidad 1800Kg/m3 Resistencia a tracción 1200 MPa Módulo de elasticidad 200 GPa	
3 contenidos de fibras	25%, 50% 75% sobre el volumen del hormigón	
CaO% óptima	20% sobre el peso del cemento	


Moldes	Metálicos cúbicos 100x100x100 mm	
Objetivo	Contener la expansión/deformación del material con un recipiente modo de confinamiento (encofrado)	
Otros	Ajuste del encofrado mediante sargentos	
Tiempo de confinamiento	14 días → tiempo donde el proceso de expansión con CaO se completa	

Tabla 5.7. Material empleado para hacer el HRF y material que se utilizó para ser confinado.

Dosificación empelada para la elaboración de las probetas de HRF y cal añadida.

Material	Descripción	Cantidad (Kg/m ³)		
		MF 0,25	MF 0,50	MF 0,75
Cemento	CEM IIA-L/42,5R	370,00	370,00	370,00
Cal	CaO	74,00	74,00	74,00
Arena 0/4	Arena 0/4	1248,75	1248,75	1248,75
Gravilla 4/12	4/12'	416,25	416,25	416,25
Agua	-	221,36	221,36	221,36
Aditivo plastificante	Master Pozzolith 7003	4,81	4,81	4,81
Fibra metálica	R HOOK 35/0,75	20,00	40,00	60,00

Tabla 5.8 Dosificación HRP

Al tener las probetas 14 días confinadas ejecutó el ensayo Barcelona de doble punzonamiento para cada una de ellas y evaluó la resistencia residual del HRP.

5.3.2. Ensayo BCN – doble punzonamiento

Para caracterizar el material endurecido, empleó el ensayo Barcelona UNE 83515, 2010, con el objetivo de determinar la tenacidad y resistencia a tracción del HRP.



Figura 5.3. Ensayo BCN con probeta de hormigón MF 0,50. (Montero, 2021)

Con este ensayo obtuvo resultados reveladores sobre el comportamiento del HRF con adición de cal que se estudiarán en el punto 6.4.

6. ANÁLISIS

En este apartado se describe el comportamiento del hormigón reforzado con fibras según el tipo de fibra, características, adherencia e interacción entre fibra-matriz, la orientación y concentración de ellas y algunas maneras de cómo mejorar el HRF. Además, se presenta una modelización sobre el proceso de expansión, con los resultados obtenidos por el TFM de Montero, donde se pretende analizar la ecuación analítica, obtener los valores del factor de amortiguamiento y estudiar la influencia de la expansión en un sistema confinado sobre el HRF y las fibras. Con esto, se modelizará el efecto de precompresión sobre las fibras y el comportamiento residual (ensayo BCN).

6.1. Comportamiento del HRF

En la ejecución del hormigón reforzado con fibras influyen varios parámetros como por ejemplo la cantidad de fibras utilizada, el módulo de elasticidad de la fibra y sus características físicas, además de la adherencia entre la fibra-matriz y la interacción. Otro aspecto importante a tener en cuenta es la orientación de la fibra en la matriz o si tiene una buena distribución para evitar que se formen disgregaciones en puntos localizados.

6.1.1. Tipo de fibra

El tipo de fibra ya sea de acero, sintética o natural, puede variar el comportamiento de un hormigón reforzado con fibras ya que el material de cada una es diferente, la textura, el tamaño (longitud y diámetro) y la manera de cómo fueron creadas definirán la adherencia entre fibra-matriz y así mismo, su comportamiento.

El tipo de fibra puede variar la resistencia al impacto y fisuración del HRF, es por ello que a continuación se explica qué aporta cada fibra al concreto.

Las fibras poliméricas parten de procesos químicos donde se obtiene filamentos sintéticos para la aplicación textil. La característica de este tipo de fibras es su alta elasticidad, pero baja resistencia a la compresión, no aguantan demasiado cuando se ejerce presión sobre ellas o se comprimen. Cabe añadir que este tipo de fibras ofrece una mejor resistencia en una sola orientación, en cambio, cuando se posicionan en ángulos perpendiculares a su dirección, tienden a debilitarse.

La principal función de las fibras sintéticas es evitar o prevenir las grietas por tracción, además de su alta resistencia a la corrosión ya que no se ve afectada debido a que estas fibras son inertes.

Otra función es que en el proceso de retracción plástica se produce una pérdida de agua debido a la evaporación por la pérdida de humedad (proceso exotérmico del hormigón). Esto conlleva a que se formen presiones negativas que desembocan en deformaciones de compresión y causan grietas internas en el concreto, este es uno de los puntos donde las fibras empiezan su trabajo activo, ya que cosen las grietas internas en la matriz que se hayan podido formar.

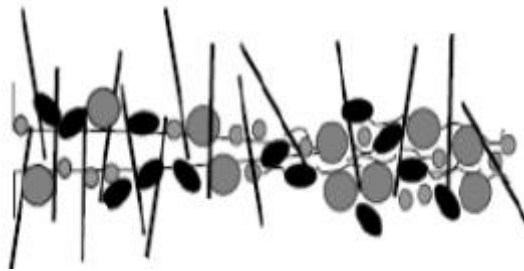


Figura 6.1. Representación de las fibras cosiendo el hormigón

Las fibras de acero le conceden al HRF un comportamiento más dúctil después de la fisuración inicial, evitando así la fractura frágil. Asimismo, mejora la resistencia a tracción, flexión y corte produciendo un aumento de la capacidad portante. Para las solicitaciones localizadas, proporcionan una resistencia adicional ya que el momento plástico esta redistribuido.

6.1.2. Forma de la fibra

Existe una gran variedad de forma en cuanto a las fibras tanto de perfil longitudinal como de su sección transversal.

Si la longitud de la fibra es corta, ofrecerá una superficie de anclaje menor. En términos de resistencia de carga, la fibra tiene una mayor resistencia que la matriz, es por ello que la matriz se agrietará antes de que la fibra y seguidamente la fibra se romperá. (Barros & Ramírez, 2021).

Se pueden clasificar en tres grupos:

Forma longitudinal

La forma longitudinal de la fibra enfocada al anclaje con la matriz se puede clasificar en la adherencia a través de su longitud como tal o, con el refuerzo de adherencia mediante muescas en los extremos de las fibras.

En la siguiente figura se muestra una representación cualitativa de la deformación de una fibra con extremos conformados y sin conformar, a medida que se aumenta la carga. Se puede apreciar que el grupo de fibras con los extremos conformados aguanta más tensión después del punto máximo pero que se de manera parecida.

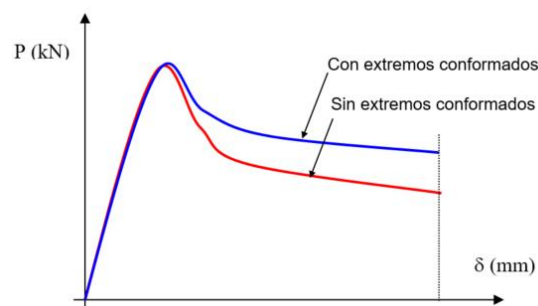


Figura 6.2. Comportamiento cualitativo de fibra conformada y sin conformar, a igualdad de otros parámetros principales

El aumento de tenacidad en las fibras del extremo conformado, puede deberse a factores como la longitud y diámetro, pero también a que la distribución real de las tensiones tangenciales alcance valores menores en los extremos. Esto conllevaría que se requiera menor energía para que se produzca un despegue en los anclajes. (Aguado, 2006)

Forma transversal

Al enfocarlo desde el punto de vista microestructural, en la interfase pasta (mortero, hormigón) se llegan a considerar los siguientes factores principales:

- El perímetro en relación con el área transversal
- La posibilidad de características adherentes diferenciadas alrededor de las fibras.

Se relaciona el perímetro con el área transversal, debido a que las condiciones adherentes aumentan cuando el contacto es con una superficie mayor.

En la tabla número 6.1. se han recogido diversas secciones para un área de 1 mm^2 , las dimensiones resultantes no corresponden a situaciones reales, solo muestran que, con una misma área, los perímetros dependen de la forma de la sección.





Dimensiones (en mm)	Geometría	Perímetro (en mm)
Circular $\phi = 1,128 \text{ mm}$		3,54
Cuadrada $a = b = 1 \text{ mm}$		4
Rectangular $a = 2; b = 0,5$		5
Rectangular $a = 4; b = 0,25$		8,5

Tabla 6.1. Dimensiones y perímetro de diversas secciones para un área de 1 mm^2 (Aguado, 2006)

Como se ha mencionado antes, cuanto mayor sea la superficie de contacto mejor serán las condiciones adherentes, en este caso se muestra como resultado que la última figura rectangular obtiene el mayor perímetro con diferencia. No obstante, las características adherentes no son uniformes, pierden eficiencia a medida que la relación a/b incrementa. Al analizar la zona inferior o superior de la fibra, se encuentra una acumulación de pasta debajo de la armadura (fibra) a medida que el flujo de hormigón ascendente envuelve la armadura (fibra). Para relaciones a/b altas la eficiencia de la adherencia disminuye significativamente ya que en la parte inferior de la fibra se formará una acumulación de lechada, que cuando empiece a evaporarse el agua quedaran poros capilares vacíos, esto provocará la pérdida adherente. En cuanto a la parte superior de la sección, la adherencia irá por el mismo camino.

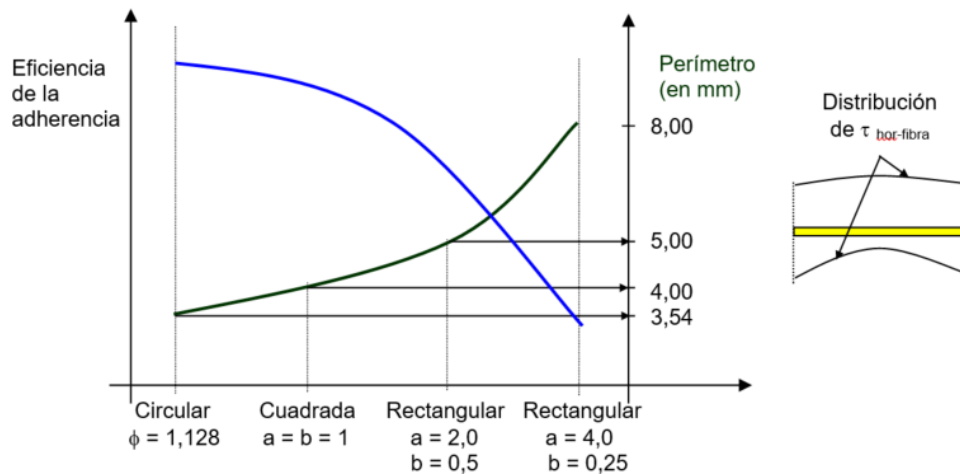


Figura 6.3. Presentación cualitativa de la eficiencia de la adherencia con el perímetro para diferentes soluciones. (Aguado, 2006)

El punto óptimo según la figura 2, posiblemente se encuentre entre la geometría cuadrada y la rectangular con relaciones a/b medias.

Esbeltez de la fibra

A través de este parámetro se mide la relación entre la longitud y el diámetro de la misma. Se estudia a través de dos puntos de vista principales:

- Trabajabilidad de la mezcla en fresco. Para una buena mezcla se recomienda trabajar con valores bajos de la esbeltez, es decir, cuando se untan de pegamento las fibras, el diámetro nominal de ellas aumenta (al tratarse de un diámetro eficaz). Por otro lado, conviene limitar los valores altos de la esbeltez (con diámetros pequeños) ya que puede ocasionar la formación de erizos.
- Características mecánicas. Al aumentar la longitud de la fibra se consiguen valores altos de esbeltez y también aumenta la longitud de anclaje. En cambio, sí se disminuye el diámetro esto conlleva un incremento de riesgo de rotura de la fibra ya que incrementa la tensión a igualdad de esfuerzo de tracción en la misma.

un aspecto adicional a tener en cuenta en relación con la esbeltez es el tamaño máximo del árido, puesto que la longitud de la fibra ha de tener una dimensión mínima para que se produzca un buen cosido entre fibras. Este cosido soportará las fisuras que se puedan producir en las interfaces del mortero con los áridos. Se recomienda como valor mínimo de longitud de fibra $l_{\text{fibra}} = 2,5 \cdot t_{\text{máx}}$.

Textura

La textura de la fibra es un factor a tener en cuenta en la adhesión fibra-matriz del cual se hablará más extendidamente en el siguiente punto.

En el caso de las fibras metálicas de tipo hojalata o, si se realiza algún tratamiento de fabricación y se utilizan elementos lubricantes que pudieran dejar rastro en la superficie del acero, la respuesta adherente disminuiría.

En grandes términos, la textura tiene un factor de anclaje menor que los extremos de las fibras. (Aguado, 2006)

6.1.3. Adherencia fibra-matriz

Es una propiedad crucial sobre todo para las fibras metálicas, han de tener una buena adherencia ya que al producirse la fisuración entra en marcha una especie de red formada por las fibras y retrasa la rotura, además, logra una ductilidad en el agotamiento del material compuesto.

Por otra parte, existe una adherencia parcial entre las fibras y la masa del hormigón, esta adherencia se produce durante la pérdida de humedad durante la fabricación del concreto, el proceso de fraguado y la retracción.

Existen dos tipos de adherencia:

- **Física:** es una combinación de adhesión, fricción y trabajo mecánico. Se establece caracterizando la forma de la fibra debido a que puede aumentar la adherencia en el hormigón y así producir un fallo del concreto por rotura de la fibra y no por deslizamiento, un efecto muy común en las fibras lisas.
- **Química:** es generada por reacciones superficiales entre el hormigón y la fibra. Este tipo de adherencia se puede mejorar recubriendo la fibra metálica con algún producto químico, como por ejemplo la resina epoxi, de esta manera se evita problemas de oxidación y galvanización.

Además de la longitud de la fibra, también influye la transmisión de la carga de la matriz a la fibra, por ello se ha de analizar la intercala de la fase matriz y la fibra. Si se aplica un esfuerzo de tracción, se observa que en los extremos no se produce una transmisión de carga desde la matriz, además, en la matriz se genera una deformación.

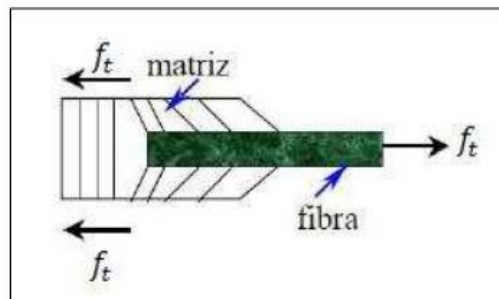


Figura 6.4. Modelo de deformación en una matriz aplicando un esfuerzo de tracción. (Mármol, 2010)

Se denomina longitud crítica (l_c) al tamaño de la fibra que permite aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta medida depende del diámetro de la fibra (d), la resistencia de unión matriz-fibra (resistencia a cizalla de la matriz, τ_c) y la resistencia a tracción (f_t). Obteniéndose con la siguiente ecuación:

$$l_c = \frac{f_t \cdot d}{\tau_c} \quad (4)$$

En función del tamaño de la fibra con respecto a la longitud crítica, se determinan varios perfiles esfuerzo-posición, como se observan en la figura 6.5.

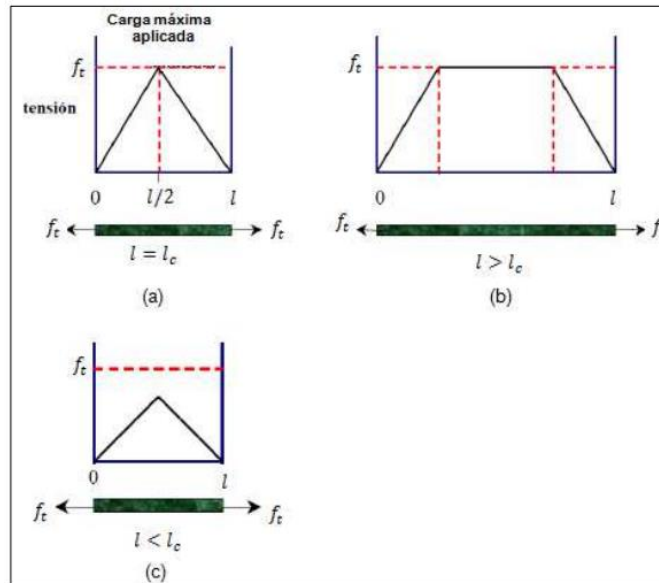


Figura 6.5.Tipos de Perfiles esfuerzo-posición cuando la longitud de la fibra l es (a) igual a la longitud crítica, (b) mayor que la longitud crítica y (c) menor que la longitud crítica en un compuesto reforzado con fibra y sometido a un esfuerzo de tracción igual a la resistencia a la tracción f_t de la fibra. (Mármol, 2010)

De la imagen mencionada anteriormente, se puede deducir:

- Si, $l=l_c$ la carga máxima se halla en el centro de la fibra
- Si, $l>l_c$ el reforzamiento es más efectivo
- Si, $l<l_c$ el refuerzo es mínimo ya que la matriz se deforma alrededor de la fibra, casi no existe transferencia del esfuerzo

Sobre la adherencia del tipo de fibras, las poliméricas por lo común tiene una baja adherencia con la pasta de cemento al igual que las de polipropileno y de polietileno Hdpe que deber ser al menos de $t=0,30$ MPa para que puedan deformarse en el proceso de fractura de la matriz. (Cornejo, 2014)

Zona de interacción interfacial ITZ

En la figura 8, se puede apreciar un ejemplo de cómo sería la zona de interacción interfacial entre la fibra y la matriz.

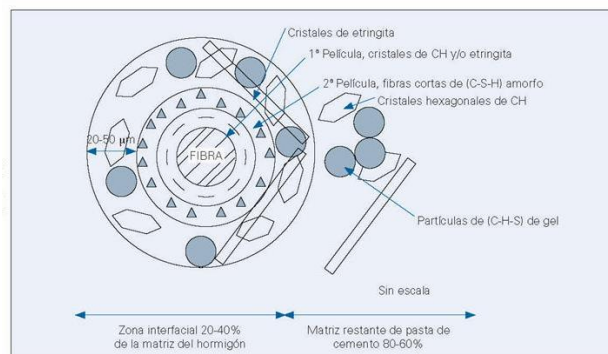


Figura 6.6. Esquema de la zona de interacción interfacial (ITZ) alrededor de una fibra (Cornejo, 2014)

La aglomeración y la adherencia condiciona la resistencia del hormigón y a la vez influye en las propiedades y comportamiento de él.

Debido a que la matriz cementicia tiende a la fisuración se designan tres fases según se van desarrollando dependiendo de la escala:

- Nanoscópica (escala, 1 nano=10⁻⁹m)
- Microscópica
- Macroscópica

La fisuración nanoscópica se produce a causa de la presencia de microporos entre las partículas de cemento y de las imperfecciones y defectos que existen en la microestructura de la pasta de cemento, que se puede encontrar en la masa como en las zonas ITZ.

Seguidamente empieza la microfisuración las fibras que se encuentran en la pasta de cemento entran en acción y retrasan el proceso de fisuración, además de reducirlo.

Se intenta que la pasta de cemento tenga una microestructura sin defectos añadiendo puzolanas para rellenar los huecos entre las partículas de cemento, logrando hormigones más densos y compactos, con lo que se obtendrá un hormigón impermeable y resistente. Obteniendo una disminución de las fisuras y esto hará que el material tenga una vida útil más larga.

Las reacciones que generan las puzolanas con los productos hidratados del cemento son muy beneficiosas porque incrementan la cantidad del material de cemento de alta densidad (silicato cálcico, [C-S-H] en la matriz y también aumentan la adherencia con los áridos y fibras añadidas. (El C-S- es el principal aglomerante del cemento y el hormigón, comienza a formarse desde las primeras etapas de hidratación del cemento y se densifica progresivamente a medida que el cemento fragua).

Al añadir nanopartículas de sílice, óxido de titanio o nanocelulosa al cemento se consigue una mejora sustancial de la microestructura de la pasta de cemento y eso hace que las propiedades sean mejor. La adición de estas nanopartículas incrementa la cantidad de C-S-H logrando unos compuestos más resistentes mecánicamente y al ataque de químicos que puedan disolver la cal del concreto. (Cornejo, 2014)

6.1.4. Interacción fibra-matriz

En el proceso del curado del hormigón, la fibra se comporta como distribuidora uniforme de esfuerzos internos de retracción (esfuerzos que tratan de separar la matriz).

Estas fibras actúan interceptando la propagación de micro-grietas que se puedan causar y paralizan su crecimiento. Además, en la acción capilar de la humedad, actúan de barrera y permiten un curado más lento.

La capacidad de carga aumenta en el momento en que la fibra se une a la matriz de concreto, la curva tensión-deformación se ve incrementada comparada con un hormigón convencional. Como se ha comentado antes, al tener una red de fibras actuando por toda la matriz del hormigón el post-agrietamiento mejora y eso permite soportar mayores cargas y alcanza valores más altos de deformación.

Gracias a la distribución tridimensional de mini-redes que forman las fibras se consigue un mejor comportamiento frente a la retracción plástica.

6.1.5. Orientación y concentración de la fibra

La orientación de una fibra relativa al plano fisura o de rotura, influye de manera importante en su habilidad en transmitir cargas. Es por ello que, una fibra que se posiciona paralela al plano de rotura no tiene efecto, mientras que una perpendicular tiene efecto máximo (Barros & Ramírez, 2021).

La disposición u orientación relativa de las fibras, además de su concentración y distribución son aspectos que influyen de manera directa en la resistencia y otras propiedades de los materiales compuestos.

A continuación, se pueden observar dos tipos de orientaciones más extremas:

1. Una alineación paralela a los ejes longitudinales de las fibras.
2. La segunda, es una alineación de manera aleatoria (a), las fibras continuas tienden a alinearse mientras que las fibras discontinúan se pueden alinear (b) o se pueden orientar al azar (c), (o alinearse parcialmente).

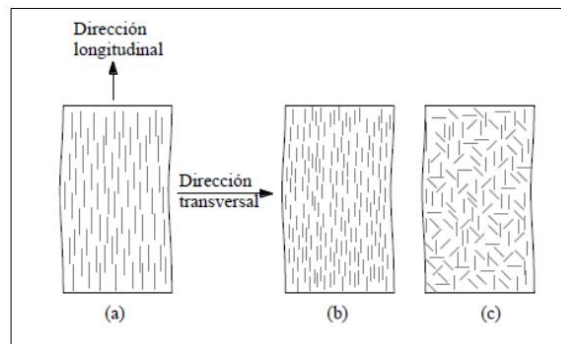


Figura 6.7. Representación de la orientación y distribución de las fibras.

Existe la teoría de que la orientación de las fibras se produce de manera que estas quedan paralelas a la dirección del flujo en las capas exteriores del molde, y una distribución más arbitraria en el centro. La orientación de las fibras y la caracterización de las capas que se producen, dependerá de los siguientes factores:

- Dimensión y forma del molde
- Temperatura del molde y del material inyectado
- Presión de inyección
- Dimensión de la fibra

Por otro lado, las propiedades del hormigón en estado fresco, el método de fundición, el flujo y geometría del encofrado también influyen en la orientación de las fibras. Es decir, cada detalle del proceso de producción tendrá una repercusión en la orientación de las fibras. (Laranjeira, 2010)

La vibración puede producir la rotación y alienar las fibras en una dirección específica (Gettu, 2005)

La vibración externa tiende a orientar las fibras en un plano perpendicular a la dirección de la vibración (Edginton & Hannant , 1972). Cuanto más se hace vibrar el HRF más tienden a alinearse las fibras en el plano horizontal. (Pujadas P. , 2021)

En cuanto al módulo de elasticidad de los materiales reforzados, no se ve afectado por la orientación de las fibras ya que está condicionado por el volumen de la cantidad de fibras que se hallen en la mezcla.

Si se requiere hacer un concreto con fibras cortas (discontinuas y con distribución aleatoria), la velocidad de producción es rápida y piezas con formas intrincadas. Siendo costes más bajos de fabricación.

En relación a la orientación de fibras individuales, al realizar un análisis detallado de orientaciones de fibra individual se llegó a la conclusión de que la distribución de los ángulos de orientación en HRF de acero sigue la ley de Gauss, además la dispersión de los ángulos de orientación depende de la orientación promedio de la fibra. (Laranjeira, 2010).

Para la respuesta mecánica, la resistencia postfisuración es proporcional al número de fibras efectivas presentes en las fisuras activas, además la efectividad de la fibra depende de su orientación.

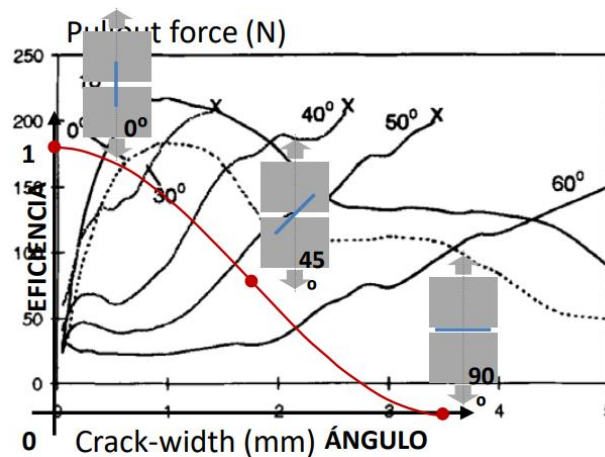


Figura 6.8. Efecto de la orientación de las fibras al aplicar tensión

EL HRF no es un material isótropo por lo que las fibras no pueden proporcionar un refuerzo uniforme de la misma manera en las tres direcciones.

6.1.6. Maneras de mejorar el HRF

Los materiales más comunes utilizados como fibras actualmente son las fibras de polipropileno, la fibra de vidrio y la fibra de acero.

La fibra de vidrio muestra un comportamiento similar que la fibra de polipropileno excepto en la resistencia a flexotracción ya que la suya es mejor, pero al tener un precio elevado se vuelve más inaccesible. Con la fibra de acero pasa algo similar pero el peso propio del acero y la dificultad de puesta en obra se convierten en dos puntos bastante negativos para ella. Es por eso que a modo sugerencia, se podría probar con una mezcla de concreto donde se puedan aplicar los beneficios de las tres fibras.

Es decir, analizar un concreto con fibras de acero, polipropileno y de vidrio, o de acero y polipropileno. Se conseguiría un concreto menos pesado y con más resistencia a la fluencia y deformación. Donde la corrosión por parte del acero no sería uno de los principales problemas ya que las fibras de polipropileno también estarían actuando y estas no sufren problemas de corrosión.

Otra manera de mejorar el HRF, sería colocando armadura longitudinal de acero además de las fibras, de esta manera se obtendría un doble refuerzo en cuanto a fisuración por carga. El peso del concreto seguiría siendo menor que el de un hormigón convencional ya que el peso de las fibras de polipropileno es casi insignificante comparado con el de la armadura de acero y al ya estar reforzado por las fibras solo haría falta poner una cantidad menor de varillas.

6.2. Factores influyentes en la expansión

6.2.1. Contenido de cal y tipo de cemento

La variedad de tipos de cementos o aditivos de expansión, además de la utilización del tipo de aluminato, condiciona la velocidad de formación de la etringita y con ello, el fenómeno de expansión que se produce en el fraguado y endurecimiento.

El contenido de cal en la mezcla de hormigón es condicionante en el desarrollo de la expansión, por otro lado, en el caso de no contener se podrían producir tensiones de tracción.

Según el estudio realizado por Montero, para poder obtener una tensión confinada significativa y medible, el porcentaje de cal mínimo debería ser superior al 10% de porcentaje de cemento. Así mismo, para obtener el valor máximo de tensión la dosificación debe ser del 20% o 30% teniendo una pequeña diferencia de centésimas. También se observó que a medida que se incrementaba la cantidad de porcentaje de cal en el porcentaje del cemento, la expansión aumentaba llegando hasta la cantidad de 30% de porcentaje de cemento.

6.2.2. Relación a/c

Cuando se reduce la relación agua/cemento se observa un incremento en la expansión, esto se da en consistencias medias.

6.2.3. Granulometría

El tipo de áridos seleccionados para el HRF ha de cumplir con una serie de requerimientos como tener una buena composición, resistencia, estabilidad, durabilidad y haber sido limpiados, un determinado tamaño de partícula, ya que afectará a la dosificación e interacción con las fibras. Por último su granulometría y forma ha de ser adecuada, empleándose áridos rodados preferentemente (arena) o machacados. La arena, al tener valores idénticos proporciona mejor docilidad que con los áridos machacados.

En el caso del uso de fibras de acero, se aconseja utilizar una mayor cantidad de finos para evitar la segregación, además de aumentar la cohesión y favorecer la trabajabilidad de la mezcla.

Así mismo, la movilidad de las fibras depende de la cantidad de árido grueso y de su tamaño máximo, cuanto mayor sean estos dos parámetros, menor será la movilidad de las fibras.

Según la JSCE (Japan Society of Civil Engineers), el valor óptimo del tamaño de árido debe ser inferior a la mitad de la longitud de la fibra.

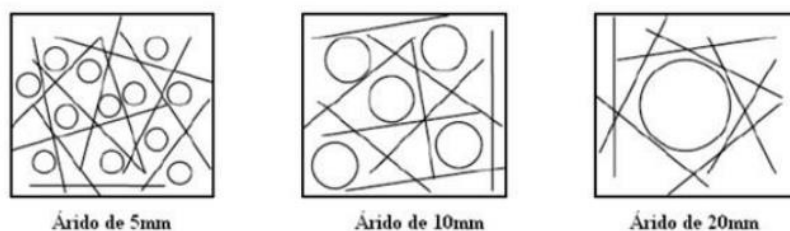


Figura 6.9. Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras (40mm de longitud) (**Hannant, 1978**)

El ACI proporciona el volumen de árido grueso por unidad de volumen de hormigón (tabla 2.15), donde los valores dependen del tamaño máximo nominal del árido grueso y el módulo de finura del árido fino.

6.2.4. Coacción de la expansión

Los límites o las armaduras causan una imposición en cuanto a la expansión, ya que ejercen de barreras y no le permiten al hormigón expandirse de una manera libre, por lo que se consigue una compresión en el hormigón del orden de 2 a 7 kg/cm² y se logra reducir la aparición de fisuras debido a la retracción por secado.

6.2.5. Curado

Al ser un hormigón pretensado con óxido de calcio, las condiciones del curado deben ser más rigurosas que un hormigón convencional para evitar los siguientes problemas con las reacciones de hidratación.

- Formación de los silicatos cálcicos hidratados
- Formación de etringita (determina la expansión)

Estas dos reacciones de hidratación se ven afectadas de manera diferente por la temperatura y el agua del curado. Si se realiza un mal curado, el nivel de expansión podría reducirse.

6.2.6. Temperatura

En cuanto a humedades relativamente bajas y con la temperatura constante la expansión empieza a descender porque

6.3. Efecto expansivo del CaO en el hormigón

6.3.1. Modelización de la expansión

Este análisis se plantea a partir del estudio realizado por el trabajo experimental de Domenica Montero en el año 2021.

En los ensayos realizados con probetas de hormigón compuesto de fibras metálicas y adición de cal se quería medir la expansión provocada por el óxido de calcio, se obtuvieron dos gráficos. La forma que presenta las curvas del primer gráfico sigue un mismo patrón a pesar de que la cantidad añadida de óxido de calcio es diferente, en cada curva se puede apreciar tres fases distintas:

- Retracción
- Rápida expansión
- Estabilización de la deformación

Las dosificaciones que contienen cal, experimentan una primera etapa de tracción y después un incremento de expansión rápida.

La expansión dependerá de la cantidad de CaO que se añada a la mezcla de concreto, según el porcentaje añadido se generará más expansión en la mezcla o menos, llegando incluso a obtener retracciones significativas en el caso de que no se añada la adición de óxido de calcio.

En las siguientes gráficas se contemplan tres estados anteriormente mencionados, inicialmente se observa la fase de la retracción seguidamente de la fase de rápida expansión y para finalizar se produce una estabilización de la deformación.

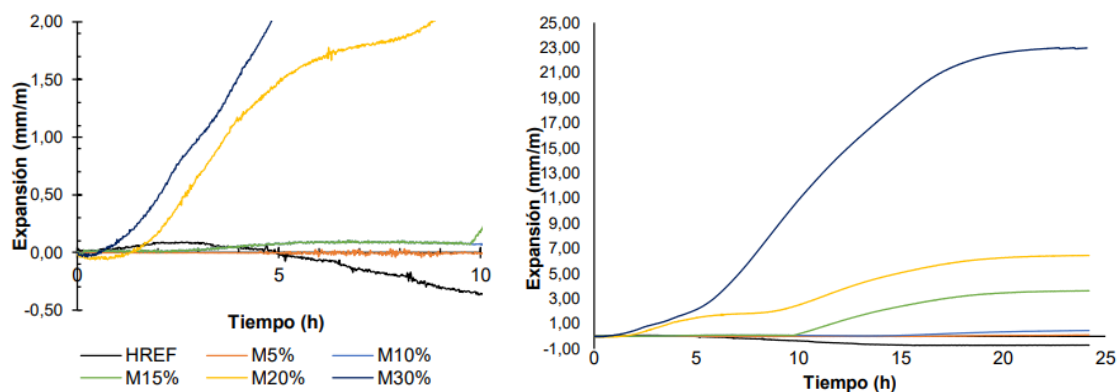


Figura 6.10. Curvas de expansión libre para diferentes tipos de dosificaciones ensayadas (Montero, 2021)

A continuación, se explicará el porqué de las fases anteriormente mencionadas.

Fase de retracción

Ocurre ya sea con cal o sin cal, es un proceso empírico en la fase del fraguado del hormigón. Esta fase tiene una duración aproximada de 5 horas desde el inicio del mezclado, además aun o se ha iniciado la reacción de los silicatos y del CaO, por lo cual el proceso de expansión aún no ha tenido lugar (Fernández, 2017)

Esta deformación volumétrica de contracción es debido al movimiento de humedad dentro del material cuando el gradiente de humedad relativa cambia entre el medio ambiente y la estructura.

Fase de rápida expansión

Si se observa la figura 6.10., la deformación comprendida entre las 5 horas hasta aproximadamente las 20h se encuentra un incremento casi instantáneo de la expansión. En menos de un día se obtienen las expansiones máximas de cada mezcla.

El porcentaje de adición de cal entra en acción, como se mencionó en el punto 3.2.2. la cal al mezclarse con el agua provoca una expansión mayor en las mezclas que contienen el 15% o más de cal, mientras que la expansión es menor con las dosificaciones inferiores al 15% de cal.

En las dosificaciones con un alto contenido de cal, la expansión incrementa de manera **exponencial** mientras que en las dosificaciones con un 5% o 10% se produce una expansión, pero casi es insignificante.

Un dato a destacar es que al analizar la expansión de las dosificaciones del 10% y 20%, si se dobla la cantidad de cal no se dobla la expansión, si no, que cuanto más cal añadida la expansión se ve incrementada en un 92%.

Cuando se lleva a cabo este proceso hay que tener en cuenta de que la mezcla con las fibras está en un molde y este delimita la expansión provocando una precompresión en el concreto.

Estabilización de la deformación

Es el estado final donde se lleva a cabo la estabilización de la expansión, es decir, la cantidad de cal ya no es un condicionante en el hormigón y la pendiente de este tramo disminuye lo suficiente hasta el punto de llegar a cero.

Estado endurecido

Una vez el proceso de fraguado ha llegado a su final, se verifica si la expansión sigue actuando en el estado endurecido del hormigón. Al pasar 24 horas de fabricación se comprueba la expansión con la ayuda de un Reloj comparador a los 7 y 14 días.

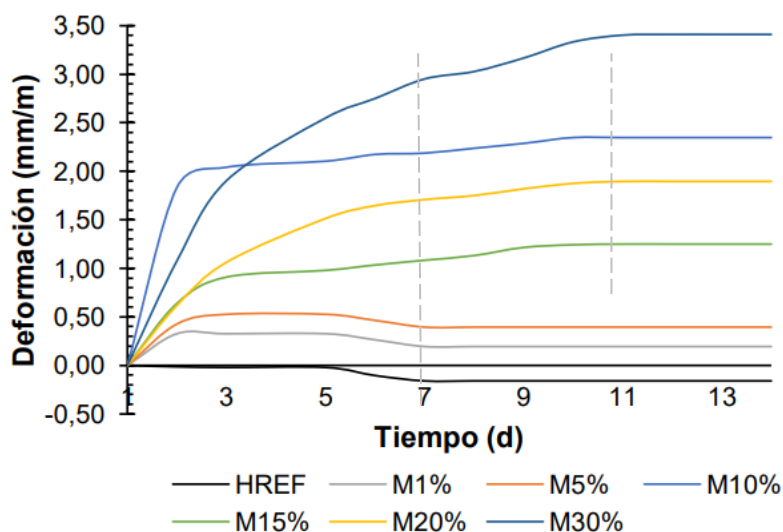


Figura 6.11. Curva de deformación de las dosificaciones ensayadas hasta los 14 días (Montero, 2021)

En la gráfica 6.11. se puede observar el tiempo que tarda cada curva a estabilizarse.

El comportamiento de la expansión en el tiempo es muy similar en casi todas las curvas, empiezan con una rápida deformación en menos de 2 días, se sigue incrementando la expansión de manera paulatina hasta llegar al punto de la estabilización en el día 7 para las mezclas con poco contenido de cal y día 14 para las mezclas con contenido de cal a partir de 15%.

La dosificación M10% tiene un comportamiento angular en el día 2 y a partir de ahí llega a estabilizarse el día 11. La curva M30% sufre la mayor expansión en un tiempo más prolongado comparado con las demás curvas, posiblemente se debe a que contiene una mayor cantidad de cal en la mezcla. En cuanto a la curva del hormigón de referencia, se produce una retracción durante 2 días y luego se estabilizada al día 7.

En la siguiente tabla se han recogido los resultados de la expansión en el tiempo.

Periodo	EXPANSIÓN (mm/m)						
	HREF	M1%	M5%	M10%	M15%	M20%	M30%
24h	-0,70	-0,70	0,10	0,46	3,63	6,45	22,98
7 días	-0,16	0,19	0,39	2,19	1,08	1,71	2,95
14 días	-0,16	0,19	0,39	2,35	1,25	1,90	3,41
Expansión total	-0,86	-0,50	0,49	2,80	4,88	8,34	26,39

¹Tabla 6.2. Valores de expansión de cada una de las dosificaciones propuestas a diferentes edades. (Montero, 2021)

6.3.2. Ecuación analítica

Las siguientes ecuaciones se han obtenido de la investigación realizada por Fernández (Fernández, 2017) las cuales fueron adaptadas para determinar la influencia de la cal en hormigones expansivos.

Con estas ecuaciones se pretende obtener una modelización del factor f y entender el efecto de la expansión sobre el HRF y con adición de óxido de calcio.

En la tabla 6.3. se pueden encontrar los datos para calcular los valores constantes de las ecuaciones 3,4, 5 y 6.

Propiedad	CaO Óxido de calcio	Ca(OH) ₂ Hidróxido de calcio
Peso molar (g/mol)	56,07	74,09
Densidad específica (g/cm ³)	3,34	2,211
Volumen molar (cm ³ /mol)	16,80	33,10

Tabla 6.3. Propiedades del CaO y Ca(OH)₂.

$$V_{molar} = \frac{masa_{molar} \left(\frac{g}{mol} \right)}{\rho_{especifica} \left(\frac{g}{cm^3} \right)} = \frac{cm^3}{mol} \quad (5)$$

¹ Valores totales calculados con la suma de la expansión las primeras 24h y la expansión del día 14.

$$CaO_{libre} = \frac{\%CaO_{añadido} \cdot D_{cemento}}{M_{CaO_{libre}}} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{productos} - V_{reactivos}}{V_{reactivos}} = \frac{V_{Ca(OH)_2} - V_{CaO}}{V_{CaO}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_v = [CaO_{libre}] \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot (a^{CaO} \cdot m^{CaO}) - f\phi \quad (8)$$

$$Expansión_{lineal} = \frac{\varepsilon_v}{3} \quad (9)$$

$$Expansión_{teórica} = \frac{\varepsilon_v \cdot K_d}{3} \quad (10)$$

El valor de la cantidad de óxido libre presente en la materia se obtiene multiplicando el porcentaje de cal libre presente en la mezcla ($\%CaO_{añadido}$) por los kilogramos de cemento por metro cubico ($D_{cemento}$), todo esto dividido por el producto de la masa molas del CaO ($M_{CaO_{libre}}$).

Mediante la ecuación número 7 se calcula la variación volumétrica que se espera en el material donde $\frac{\Delta V}{V}$ se entiende como la variación de volumen (el cambio de volumen que se produce al pasar de CaO a Ca(OH)₂) entre reactivos y productos, con unidades en g/cm³ del Ca(OH)₂. (Fernández, 2017)

Se obtiene la expansión volumétrica del material a partir de la ecuación 8, donde a^{CaO} es el coeficiente estequiometrico entre los moles de CaO y moles de Ca(OH)₂, que en este caso es 1 (debido a que 1 mol de CaO equivale a 1 mol de Ca(OH)₂). El termino m^{CaO} se define como el volumen molar de CaO y la letra f representa el factor de amortiguamiento de la expansión.

En la tabla 6.4. se ha recogido los valores de expansión teórica y real que obtuvo Montero en su trabajo para poder modelizar la expansión y así encontrar el factor de amortiguamiento (f).

Dosificación	Cemento (Kg/m3)	CaO	Porosidad (%)	f (%)	Expansión teórica (mm/m)	Expansión real (mm/m)
M1%	370	1%	15,80	13	-3,34	-0,50
M5%	370	5%	15,23	13	-0,39	0,49
M10%	370	10%	14,92	22	3,36	2,80
M15%	370	15%	13,90	22	4,52	4,88
M20%	370	20%	12,62	22	8,58	8,34
M30%	370	30%	12,77	22	15,55	26,39

Tabla 6.4. Resultados de la expansión teórica a partir de la ecuación () y resultados reales del ensayo reloj comparador (Montero, 2021)

6.3.3. Factor de amortiguamiento

Teniendo en cuenta los datos anteriores a continuación se procede a aplicar las ecuaciones paso por paso:

- Se determinan las variables constantes

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{74,09 \frac{g}{mol}}{2,21 \frac{g}{cm^3}} - \frac{56,07 \frac{g}{mol}}{3,34 \frac{g}{cm^3}}}{\frac{56,077 \frac{g}{mol}}{3,34 \frac{g}{cm^3}}} = 0,9957$$

$$a^{CaO} = 1$$

$$m^{CaO} = 16,79 \frac{cm^3}{mol}$$

$$M_{CaO} = 56,07 \frac{g}{mol}$$

- Cogiendo como referencia los resultados de expansión real y de la porosidad, se ha calculado el factor f.

$$CaO_{libre} = \frac{10\% \cdot 370 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{10^3 g}{1kg} \cdot \frac{1m^3}{10^6 cm^3}}{56,08 g/mol} = 6,5977 \cdot 10^{-4} mol/cm^3$$

$$f = \frac{CaO_{libre} \cdot \frac{\Delta V}{V} \cdot (a^{CaO} \cdot m^{CaO}) - \varepsilon_v}{\phi} =$$

$$f = \frac{6,5977 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{cm^3} \cdot 0,9957 \cdot \left(1 \cdot 16,79 \frac{cm^3}{mol}\right) - 0,0084}{0,1492} = 0,0177 \rightarrow 1,77\%$$

Aplicando el factor f en la ecuación directamente se verifica que la expansión es la misma.

$$\varepsilon_v = 6,5977 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{cm^3} \cdot 0,9962 \cdot \left(1 \cdot 16,79 \frac{cm^3}{mol}\right) - 0,0177 \cdot 0,1492 = 0,0084$$

$$Ex_{teórica(M10\%)} = \frac{0,0084}{3} = 0,0028 \frac{m}{m}$$

En la tabla 6.5. se muestran los valores del factor f para la expansión teórica y real, calculados con la expansión total y la expansión teórica. Para poder visualizar el comportamiento y como se desarrolla el factor de amortiguamiento se ha utilizado los datos obtenidos de cada una de las dosificaciones de CaO de los ensayos de expansión (las primeras 24 horas) y del ensayo de reloj comparador hasta los 14 días (tabla 6.7.).

Ca	Porosidad (%)	Expansión teórica (mm/m)	f (%)	Expansión real (mm/m)	f (%)
1%	15.80	-3,34	7.04	-0.5	1.65
5%	15.23	-0,39	4.39	0.49	2.66
10%	14.92	3,36	0.64	2,80	1.77
15%	13.90	4,52	2.15	4,88	1.38
20%	12.62	8,58	-2.90	8,34	-2.33
30%	12.77	15,55	-10.60	26,39	-36.07

Tabla 6.5. Datos en la expansión real y teórica del trabajo de Montero.

Expansión mm/m							
Tiempo (h)	HREF	M1%	M5%	M10%	M15%	M20%	M30%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	-0.34	0.05	0.00	0.04	0.04	1.16	1.24
8	-0.45	-0.21	0.01	0.09	0.09	1.84	4.58
12	-0.56	-0.53	0.00	0.04	1.19	3.67	10.98
16	-0.65	-0.72	-0.02	0.12	2.71	5.42	15.56
20	-0.75	-0.72	0.05	0.36	3.45	6.26	17.85
24	-0.70	-0.70	0.12	0.46	3.63	6.45	22.98
Factor f (%)							
t(h)	HREF	M1%	M5%	M10%	M15%	M20%	M30%
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.50	0.54	3.21	6.38	10.03	13.32	21.49
8	0.66	0.98	3.18	6.30	9.95	11.84	14.16
12	0.82	1.52	3.21	6.38	7.92	7.93	0.13
16	0.95	1.85	3.23	6.24	5.15	4.16	-9.93
20	1.10	1.85	3.11	5.83	3.79	2.36	-14.95
24	1.02	1.82	3.00	5.64	3.47	1.95	-26.21

Tabla 6.6. Valores del factor f obtenidos a partir de los datos del ensayo de expansión durante 24 horas.

Expansión (mm/m)							
Periodo	HREF	M1%	M5%	M10%	M15%	M20%	M30%
0d	0	0	0	0	0	0	0
1d	-0.7	-0.7	0.1	0.46	3.63	6.45	22.98
14d	-0.86	-0.5	0.49	2.8	4.88	8.34	26.39
Factor f (%)							
Periodo	HREF	M1%	M5%	M10%	M15%	M20%	M30%
0d	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1d	1.02	1.81	3.03	5.65	3.46	1.95	-26.21
14d	1.55	1.65	2.66	1.77	1.38	-2.33	-36.07

Tabla 6.7. Valores del factor f de 0 a 14 días obtenidos a partir de los datos del reloj comparador.

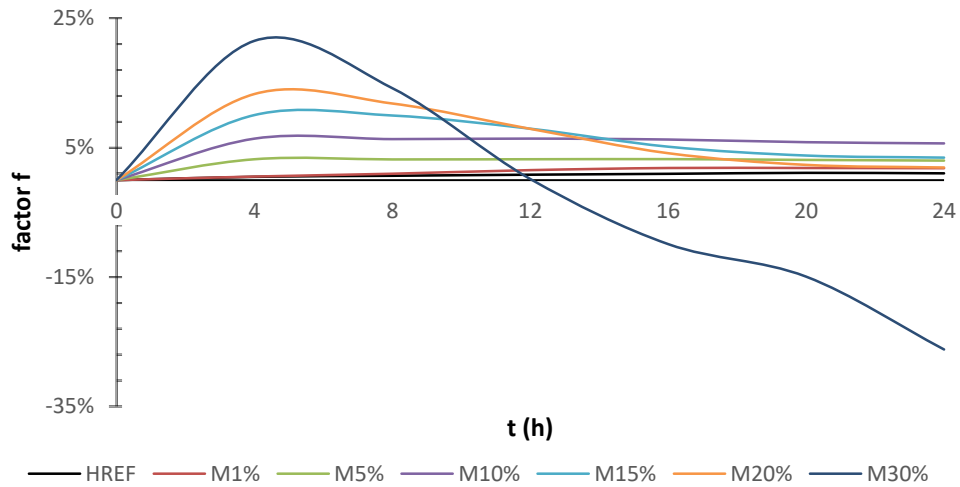


Figura 6.12. Curva del comportamiento del factor f obtenida por el ensayo de expansión hasta las 24h.

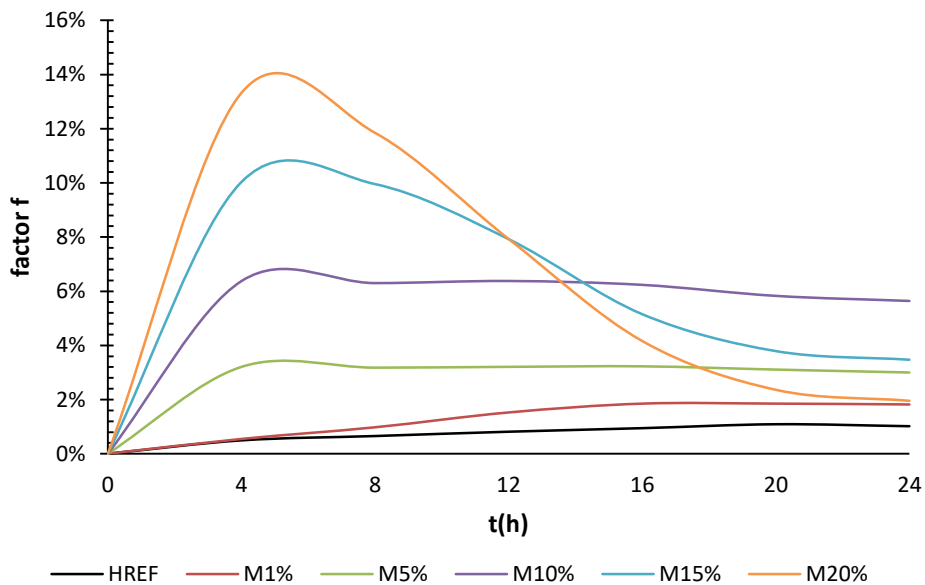


Figura 6.13. Curva del comportamiento del factor f obtenida por el ensayo de expansión hasta las 24h.

En las figuras 6.12. y 6.13. se observa cómo varía el factor f a medida que aumenta la expansión, este desarrollo se podría describir en 3 fases, la primera donde sufre un incremento exponencial, la segunda fase el decrecimiento y por última parece sufrir un estado de estabilización ficticio ya que no se puede saber con exactitud porque solo se evalúan los datos de las primeras 24 horas. Es por ello que en la figura 6.15. se ha analizado este factor hasta los 14 días.

La mezcla del HREF sigue el mismo comportamiento que el de la mezcla M1%, en cambio para la mezcla M20% y M30% el factor f aumenta en tan solo 4 horas hasta un 13,32% y 21,49% siendo los valores más altos de todas las mezclas. Según Tixier et al (Tixier & Mobasher, 2003), el rango de valores para este parámetro está comprendido

entre 5% y 40% por lo que se deduce que son valores correctos ya que están dentro del rango marcado.

Las demás mezclas siguen un desarrollo más o menos parecido, es por ello que se analizan los extremos (M1% y M20%), ya que siguen comportamientos muy diferentes.

Para comprender la influencia de la expansión se describe primero que es el factor de amortiguamiento f , este representa la porción de porosidad que se llena y está asociado con el amortiguamiento de la expansión.

La cantidad de productos expansivos generados es independiente de este parámetro; sin embargo, aumentarlo reduce significativamente la tasa de expansión. Cuando f aumenta, indica que se dispone de suficiente porosidad interna para los productos de expansión. Por lo tanto, tanto la expansión final como la tasa de expansión prevista se reducen. Sí se reduce f , el volumen generado dará como resultado directamente la generación de tensiones internas y esta expansión. (Tixier & Mobasher, 2003)

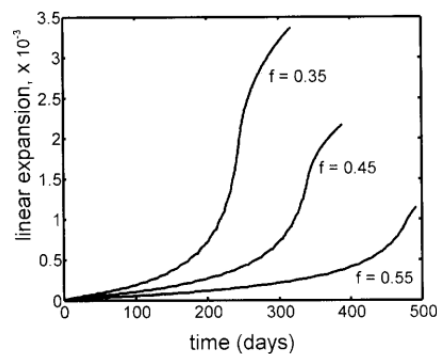


Figura 6.14. Efecto del valor del parámetro f sobre la tasa de expansión (Tixier & Mobasher, 2003).

La Fig. 6.14 muestra la influencia del valor de la fracción de porosidad capilar que se puede llenar con los productos de expansión (parámetro f).

Es importante recalcar que no toda la cal añadida genera expansión, parte queda amortiguada por la matriz durante el proceso de hidratación. Toda la cal introducida se hidratará y aumentará de volumen, pero solamente se hidratará en un medio suficientemente rígido como para generar deformación. Por ese motivo, parte de la deformación generada por la cal introducida quedará amortiguada por la plasticidad del medio. Se ha observado que a mayor contenido de cal mayor es el porcentaje de amortiguamiento que presenta el material.

Continuando con la misma línea, no toda la expansión medida genera tensiones en el material si no que al igual que para la primera se produce un segundo amortiguamiento (una parte queda nuevamente amortiguada en la matriz). (Fernández, 2017)

La figura 6.15 muestra un decrecimiento paulatino del factor de amortiguamiento para cada una de las dosificaciones.

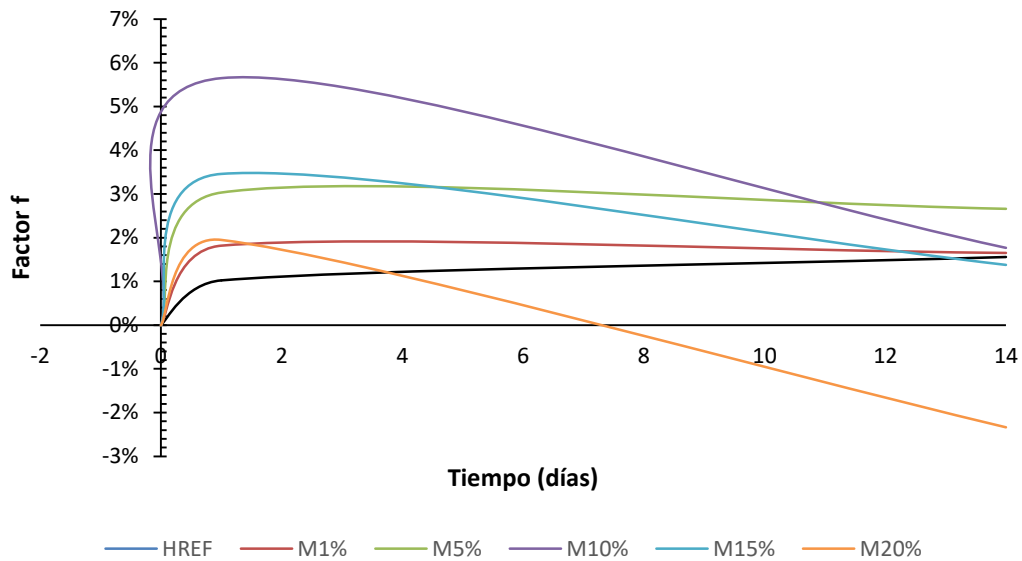


Figura 6.15. Curva del factor f obtenida a partir del ensayo de reloj comparador hasta los 14 días.

En resumen, si el factor f aumenta se tendrá más porosidad interna y la expansión será menor. Esto se puede interpretar cogiendo como ejemplo la mezcla M10% o M20%, en estas dos últimas mezclas el factor f decrece y la expansión aumenta, esto es debido a que el número de poros interno libres es menor porque se han llenado por los agentes expansivos de la expansión.

6.4. Efecto de la precompresión sobre el HRF

Se analiza tres tipos de hormigón donde el contenido de fibra es de 0,25, 0,50 y 0,75 en porcentaje del volumen de hormigón. Las probetas fueron confinadas durante 14 días, tiempo necesario para el desarrollo de la expansión del porcentaje óptimo de cal (20%). Al pasar los 14 días se aplicó el ensayo Barcelona, este permite determinar la resistencia a tracción indirecta del hormigón reforzado con fibras.

En la figura 6.16. se muestra una representación general del trayecto que sigue el desplazamiento vertical según el incremento de carga.

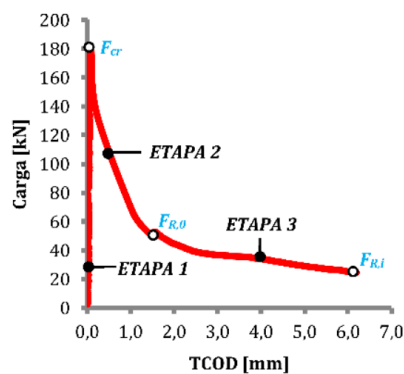


Figura 6.16. Representación de curva típica de carga vs desplazamiento vertical para el Ensayo BCN (desplazamiento de apertura circunferencial total o TCOD) (Pujadas P. , 2021)

Se pueden observar 3 etapas, la primera donde ocurre la fase elástica y es lineal, la segunda donde se encuentra la fase de transición y la última, se lleva a cabo el desarrollo de la rama residual. En la etapa 1, las tensiones generadas son íntegramente resistidas por la matriz del hormigón (aún sin fisurar) y su comportamiento se considera elástico lineal (Pujadas P. , 2021). En la etapa 2, empieza cuando las tensiones alcanzan la resistencia a tracción. Así mismo, también se forman las fisuras principales y los conos bajo punzones, esto marca una transición entre la etapa 1 y 3 respectivamente.

Al haberse estabilizado las fisuras principales, da comienzo la etapa 3 en la que se produce un deslizamiento entre los conos formados y los bloques de hormigón resultantes tras la fisuración de la probeta. Esta etapa corresponde al tramo en el que se desarrolla la resistencia residual del HRF. (Pujadas P. , 2021)

6.4.1. Resistencia residual del HRF con o sin CaO

A continuación, se analiza la resistencia residual a tracción del hormigón con fibras (f_{ctRx}), esta nos indica cuanta carga puede seguir soportando el material del momento de la fisura antes de colapsar. En un hormigón convencional, cuando la matriz del hormigón ha fisurado el concreto colapsa junto con la estructura, no hay nada que le aporte un mecanismo de sujeción y pueda aguantar un tiempo adicional. En el hormigón reforzado con fibras ocurre algo diferente, la falla y el colapso de la estructura no son simultáneos, cuando empiezan a aparecer la fisura principal la estructura puede seguir absorbiendo cargas externas sin colapsar. Esto le permite a la estructura seguir funcionando. (Mendoza J. , 2012)

Se denomina a la carga unitaria que corresponde a una deformación circunferencial determinada Rx como resistencia residual a tracción f_{ctRx} , esta resistencia se obtiene según la siguiente ecuación:

$$f_{ctRx} = \frac{4 P_{RX}}{9 \pi a H} \quad (11)$$

Donde:

P_{RX} es la carga correspondiente a una deformación circunferencial total Rx (en N)

a es el diámetro del disco de aplicación de la carga (en mm)

H es la altura de la probeta (en mm)

Con la ecuación de la resistencia residual a tracción y los resultados de los ensayos de Montero en el ensayo BCN, se consigue la gráfica de resistencia residual a tracción vs desplazamiento vertical para cada uno de los hormigones del ensayo con cal y sin cal.

En la figura 6.17. se observa que no hay desplazamiento para la tensión pico, al llegar a la resistencia residual máxima la matriz del hormigón empieza a fisurarse, en este punto entran en acción las fibras donde resistirán las tensiones a la que está sometida la probeta.

Cuando se llega al punto máximo de la resistencia residual esta entra en decadencia y los desplazamientos van en aumento. En este punto la fisura principal ya se ha estabilizado y se desarrolla la resistencia residual a tracción.

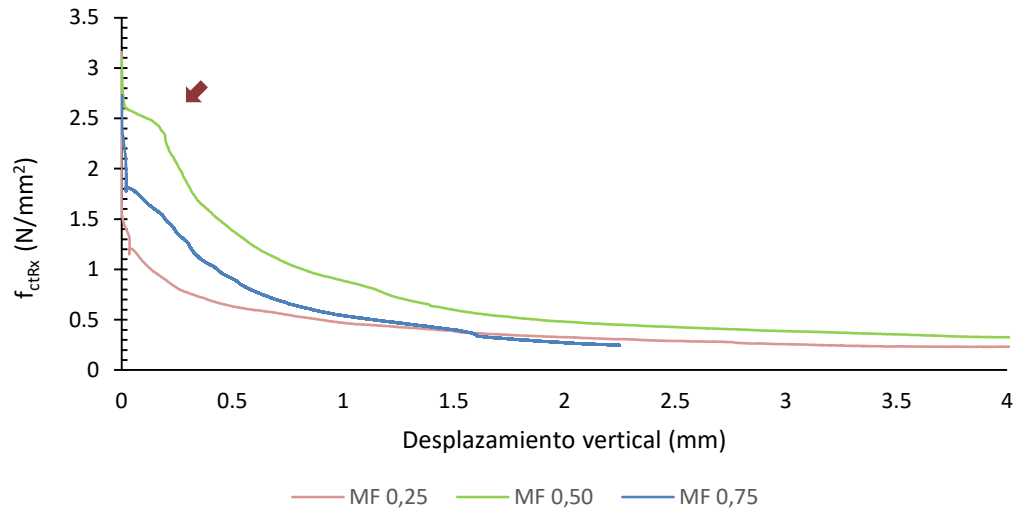


Figura 6.17. Resistencia residual vs desplazamiento vertical para HRF con distinto contenido de fibras y con CaO 20%

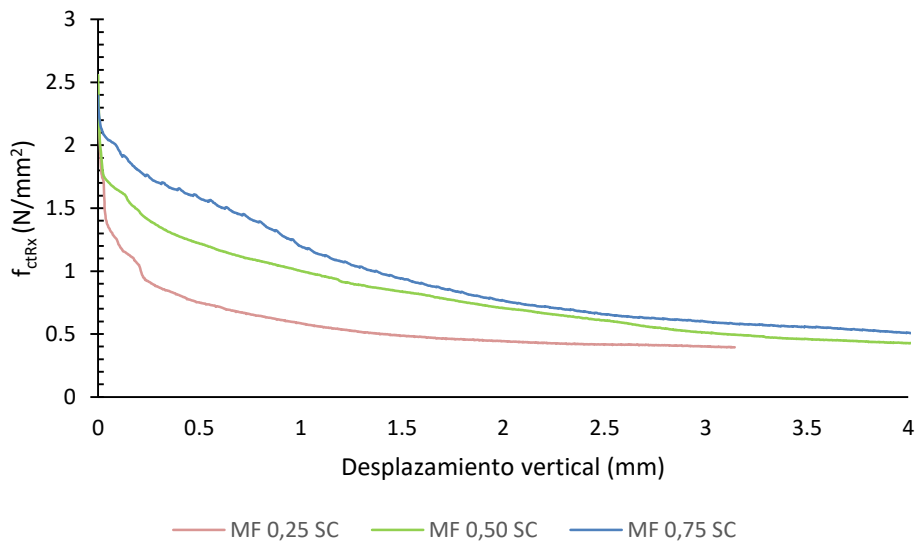


Figura 6.18. Resistencia residual vs desplazamiento vertical para HRF con distinto contenido de fibras sin CaO

Resistencia residual						
Desplazamiento vertical	Probetas HRF con CaO y sin CaO					
	MF 0,25	MF 0,25 SC	MF 0,5	MF 0,5 SC	MF 0,75	MF 0,75 SC
f_{ctR0}	3,16	2,23	3,1	2,56	2,73	2,39
$f_{ctR0,5}$	0,63	0,75	1,38	1,22	0,91	1,58
$f_{ctR1,5}$	0,39	0,49	0,6	0,84	0,4	0,94
$f_{ctR2,5}$	0,29	0,41	0,43	0,61	0,25	0,66
$f_{ctR3,5}$	0,23	-	0,35	0,46	0,19	0,56

Tabla 6.8. Valores de f_{ctRx} para los puntos de desplazamiento vertical de las muestras de HRF ensayadas

La mezcla de hormigón reforzado con fibras con adición de cal (MFC) del 50% obtiene el mejor comportamiento de resistencia residual a largo plazo comparado con la MF0.25 y MF.0,75, pero la MFC 0,25 muestra la resistencia residual máxima comparada con las demás mezclas.

Esto puede indicar que al aplicar tensión las fibras funcionan como una red de distribución de tensiones y cuanto mayor sea la cantidad de fibras mejor resistirá debido a que los esfuerzos se redistribuirán por todas ellas. En cuanto la máxima resistencia del MF0,5, es gracias al hormigón ya que de las tres (0,25, 0,5 y 0,75) las que más resistencia han obtenido son las que menos fibras contenían.

También se ha podido observar la importancia de la cal en el hormigón, puesto que en la figura 6.18. la MFSC 0,5 muestra un comportamiento peor que la MFC 0,5, ya que la MFSC 0,75 acaba resistiendo más por el contenido de fibras, esto también se puede demostrar con observando el comportamiento de la MFC0,25 y MFSC0,25, la falta de cantidad de fibras le otorgan una pésima resistencia residual.

Finalmente, después de haber aplicado el ensayo BCN y modelizado la precompresión que sufre cada una de las mezclas con diferentes cantidades de fibras y adición de cal del 20% sobre el peso del cemento, se llega empíricamente a obtener la cantidad optima de fibras con cal, el mejor diseño del conjunto matriz, tipo y cantidad de fibras.

Influencia de la compresión confinada en las propiedades del HRF

Al tratarse de un medio confinado, significa que en cuanto empiece el proceso de expansión, la masa irá aumentando de volumen, pero el espacio no puede variar ya que está limitado por el encofrado. A medida que se desarrolla la expansión, se crean tensiones dentro del hormigón, se consigue una reducción de poros y se eleva la permeabilidad del hormigón, así mismo la resistencia aumenta.

La pieza resultante de la precompresión química se encontrará en tensión creciente hasta que alcance la estabilidad.

Paras las mezclas de hormigón con fibras y CaO (MFC), se observa que alcanzan una resistencia superior a las mezclas de hormigones con fibras sin óxido de calcio (MFSC), pero también sufren un decrecimiento repentino con el desplazamiento vertical casi nulo, seguidamente adoptan un comportamiento que les permite resistir de manera casi constante, aunque esta vez, el desplazamiento vertical va incrementando lentamente.

Tras esta corta resistencia se observa que empieza una fase de decadencia ya que la curva decrece aún más rápido y con mucho más desplazamiento vertical.

El punto que está señalando la flecha de color rojo en la figura 6.17. es especialmente interesante debido a que significa un sobreesfuerzo de la MFC para continuar soportando la carga sin llegar a desplazarse demasiado.

Teniendo en cuenta que la probeta ha sido confinada 14 días y que se encuentra bajo los efectos la expansión, se crea la hipótesis de que ha logrado este impulso gracias a los beneficios de la precompresión generada por la expansión.

Es decir, al confinar la probeta sin posibilidades de que pueda expandirse, se crea una mezcla más compacta, debido a que las fuerzas de tracción que provocan la expansión

generaran un efecto parecido al del pretensado convencional. El mortero y las fibras serán comprimidos y compactados reduciendo su porosidad, aumentando la densidad y por lo tanto su compactibilidad. Estas mejoras provocan un incremento de resistencia que le permite seguir soportando carga durante un tiempo determinado hasta decrecer y llegar al colapso.

Así mismo, las fibras juegan un papel decisivo en cuanto resistencia residual, ya que entran en funcionamiento después de la falla por agrietamiento al alcanzar la máxima resistencia. Como se ha mencionado anteriormente, el comportamiento de las fibras al trabajar con una especie de red, distribuyen las cargas a la vez que cosen las fisuras que se vayan formando. La combinación de la precompresión y la cantidad óptima de fibras podrían crear ese sobreesfuerzo en cuanto a resistencia.

En cuanto a la figura 6.18. de MFSC se observa un comportamiento similar pero continuo, no sufre ningún receso ni mantiene la resistencia, su curva es casi continua y decreciente. También se observa que la MFSC 0,75 es la que mejor resiste, todo lo contrario que con la MFC.

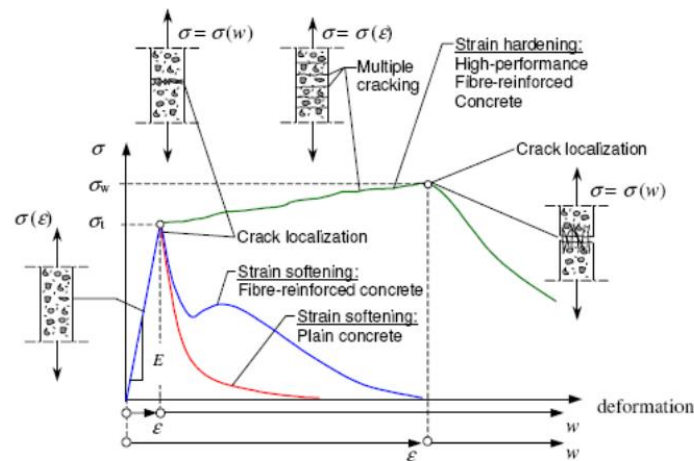


Figura 6.19. Resistencia a tracción de hormigón con fibras y sin fibras (Pujadas P. , 2021)

En la figura 6.19 se muestra un ejemplo de la diferencia del comportamiento de tensión de un hormigón convencional, HRF y HRF de altas prestaciones.

7. CONCLUSIÓN

A lo largo de este trabajo se ha observado cómo influye el óxido de calcio como agente expansivo y la cantidad/características de las fibras en el comportamiento del hormigón.

En la figura 7.1 se muestra una representación a modo de recopilación de la trayectoria estudiada, las imágenes son solo representativas para poder entender de una forma más clara los puntos que se han analizado en este trabajo.

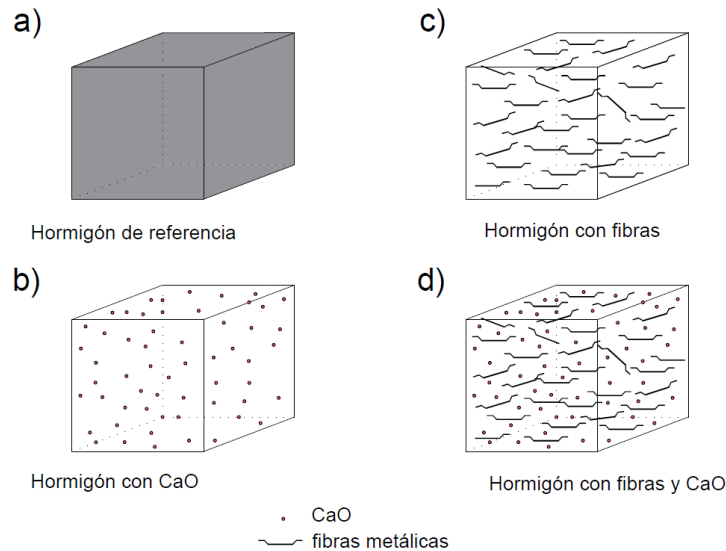


Figura 7.1. Resumen de las probetas ensayadas y analizadas.

Todos los resultados de los ensayos estudiados parten del hormigón de referencia (a), a partir de ahí se han analizado probetas de hormigón con dosificación de CaO (b) (1%, 5%, 10%, 15%, 20% y 30%) para encontrar el porcentaje de amortiguamiento.

Con los datos proporcionados por el ensayo de la expansión simple (24 horas) y el del reloj comparador (14 días) se ha modelizado el factor de amortiguamiento y con ello, se ha trazado la trayectoria desde el primer momento hasta los 14 días.

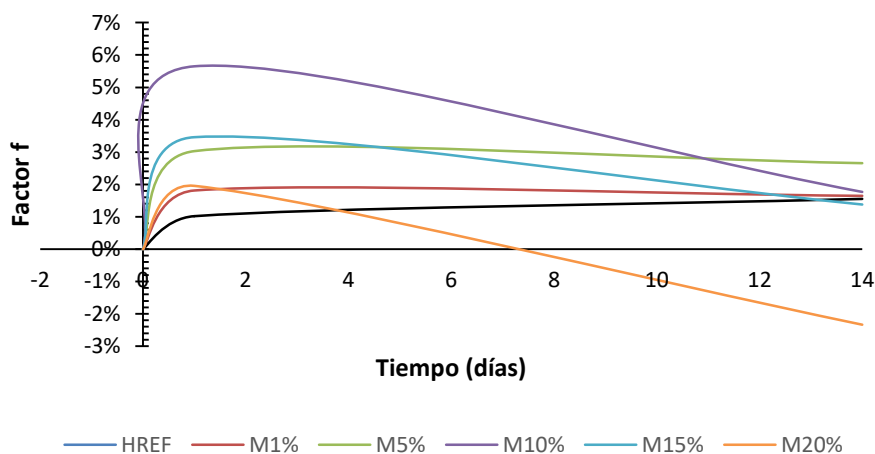


Figura 7.2. Factor de amortiguamiento en función del tiempo.

Sí se reduce f , el volumen generado dará como resultado directamente la generación de tensiones internas y esta expansión. (Tixier & Mobasher, 2003). Si se observa la M20% después de 14 días su factor de amortiguamiento es negativo, esto puede ser un error al

tomar las medidas de expansión o en tal caso, habría que realizarse más ensayos con esta dosificación, ya que las demás muestras se encuentran en el mismo rango de valores.

Al encontrar el factor f , se ha procedido a analizar los datos de los ensayos de las mezclas HRF con cal (c) y sin cal (d), (con el porcentaje óptimo de cal, 20%).

Creando un modelo para cada una de las mezclas MFC y MFCS, se ha conseguido observar las diferencias que implica si se añade una cierta cantidad de fibras, o tanto si se añade cal o como si no. Figura 7.4.

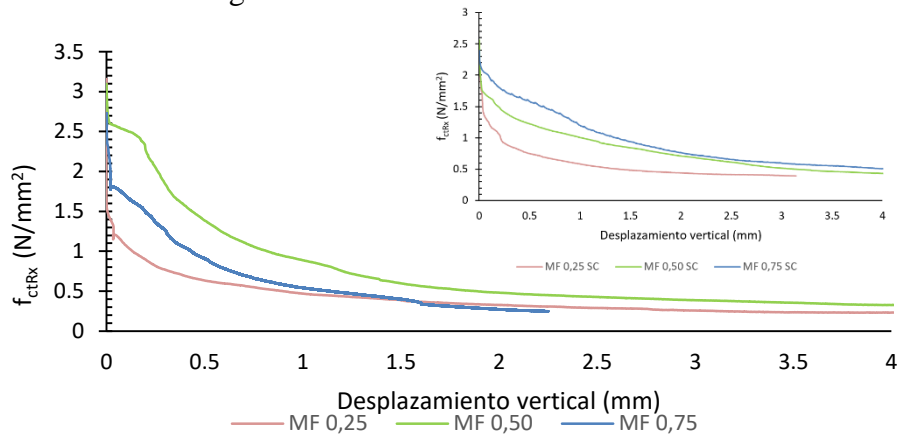


Figura 7.3. Comparación de resistencia residual de un HRF con CaO (MFC) y sin CaO (MFSC).

En la figura 7.4. se observa como la MFC alcanza más resistencia residual, siendo la MFC 0,50 la que mejor comportamiento muestra.

En general, la influencia de la cal combinada con las fibras aplicando un confinamiento inicial, hacen del hormigón un material capaz de soportar de un 10% a un 40% más la resistencia residual que un hormigón convencional. Además, las fibras proporcionan resistencia a la tracción y dan ductilidad después de la fisuración, por ese motivo las muestras pueden seguir resistiendo.

En las curvas de MFSC se observa un sobreesfuerzo para continuar soportando la carga sin llegar a desplazarse demasiado, esto puede ser debido a que la probeta ha sido confinada 14 días y que se encuentra bajo los efectos la expansión, es decir, cuenta con los beneficios de la precompresión generada por la expansión.

Al confinar la probeta sin posibilidades de que pueda expandirse, se obtiene un hormigón más compacto debido a que las fuerzas de tracción que provocan la expansión generaran un efecto parecido al del pretensado convencional. El mortero y las fibras serán comprimidos y compactados reduciendo su porosidad, aumentando la densidad y por lo tanto su compactibilidad.

Como se ha mencionado anteriormente, el comportamiento de las fibras al trabajar con una especie de red, distribuyen las cargas a la vez que cosen las fisuras que se vayan formando. La combinación de la precompresión y la cantidad óptima de fibras podrían crear ese sobreesfuerzo en cuanto a resistencia.

En la figura 7.2. se muestra un ejemplo general de la trayectoria que seguiría un HRF y un hormigón simple según aumenta la tensión y como varia la deformación en consecuencia del aumento.

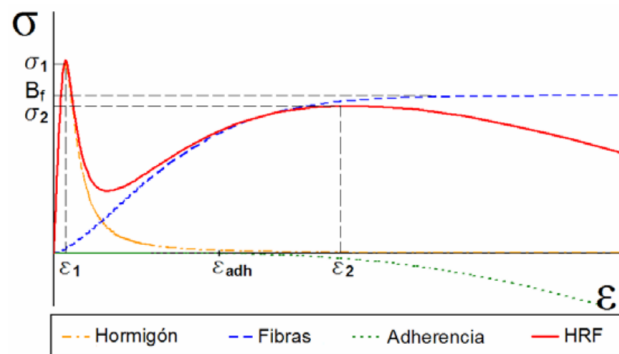


Figura 7.4. Superposición de hormigón convencional, fibras y pérdida de adherencia

Los resultados obtenidos son bastante similares es los de la figura 7.2. exceptuando que las muestras fueron confinadas durante 14 días, el tiempo necesario para que la expansión pueda desarrollarse por completo. Además, como se ha mencionado anteriormente, el factor f juega un papel importante, ya que nos indica el porcentaje de cal que ha sido amortiguado por la matriz. En la figura 6.4 se observa como la M20% acaba obtenido un factor f negativo mientras que las demás muestras se mantienen en entre el 1% y el 6%. Estos datos despiertan incertidumbre debido a que se encuentran fuera del rango de amortiguamiento descrito por Tixier y Mobasher. (Tixier & Mobasher, 2003)

En definitiva, el hormigón reforzado con fibras mejora sus características al contener óxido de calcio y haber sido confinado para desarrollar un pretensado químico, sin duda obtiene una mejor resistencia residual comparado con el hormigón convencional.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI. (1996). *State of art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI 544. IR-96.* Michigan.
- Aguado, A. (2006). *Interacción Fibras Hormigón. Bases conceptuales para las características de las fibras.* Nota técnica 2006 NT 05 V1, Ingeniería de la construcción.
- Areaciencias. (n.d.). *Areaciencias.* Retrieved from <https://www.areaciencias.com/quimica/oxido-de-calcio/>
- Badr, A. (2006). Statistical variations in impact resistance of polypropylene fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734743X05000849>
- Barros, V., & Ramírez, H. (2021). *Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 MPa con agregados de la cantera de Pifo.* Trabajo de final de grado. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/517>
- Chu, S. (2022). Bio-inspired self-prestressing concrete (SPC) involving basalt fibers and expansive agent. *Cement and Concrete Research.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884622000266>
- Corinaldesi, V. (2016). Mechanical characterization of Engineered Cement-based Composites prepared with hybrid fibres and expansive agent. *Composites Part B.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816307417>
- Corinaldesi, V. I. (2015). The influence of expansive agent on the performance of fiber reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181500495X>
- Cornejo, L. (2014, Abril 29). *Redacción Ingeopres.* Retrieved from Interempresas Obras Públicas: <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/140631-la-mejora-de-las-propiedades-de-los-hormigones-reforzados-con-fibras-asi-como-su-poder-aglomerante-y-su-adherencia.html>
- Edginton, J., & Hannant, D. (1972). Steel fibre reinforced concrete: The effect on fibre orientation of compaction by vibration. *National Academies.* Retrieved from <https://trid.trb.org/view/109456>
- Fernández, C. (2017). *Desarrollo de materiales con retracción compensada a partir del óxido de calcio (CaO).* Tesis doctoral. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/116000>
- Gagné, R. (2016). The expansive agent contains granules of dead-burn lime (CaO) that. *Science and Technology of Concrete Admixtures.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000229>
- Gettu, R. (2005). *Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens.* Materials and Structures.
- Hannant, D. (1978). Fibre cements and fibre concretes.
- Khan, M. (2022). Protection of steel tube against corrosion using self-prestressing UHPC prepared with expansive agent and steel fibers. *Structures.* Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352012421011930>
- Laranjeira, F. (2010). *Desing-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete.* Tesis doctoral, Ingeniería de la Construcción. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93486>

- Li, L. (2019). Synergistic effects of steel fibres and expansive agent on steel bar-concrete bond. *ScienceDirect*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946518306450?via%3Dihub>
- Lin, M. (2022). Combined effects of expansive agents and glass fibres on the fracture performance of seawater and sea-sand concrete. *ScienceDirect*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422012522#bib41>
- Mahmood, A. (2021). Effects of different expansive agents on the properties of expansive cementitious materials. *Materials Science and Engineering*. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1200/1/012002/pdf>
- Mármol, P. (2010). *Hormigones con fibras de acero características mecánicas*. Trabajo de final de máster, E.T.S.I Caminos, Canales y Puertos (UPM). Retrieved from <https://oa.upm.es/4510/>
- Mendoza, J. (2012). *Análisis del esfuerzo residual en concreto para pavimento rígido reforzado con fibras metálicas y sintéticas*. Trabajo de final de grado, Universidad Militar Nueva Granada. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/143448523.pdf>
- Mendoza, W. (2016). *Estudio del comportamiento de la cal hidratada como estabilizante en arcilla altamente plástica*.
- Mo, L. (2014). MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future. *ScienceDirect*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884613002615>
- Montero, D. (2021). *Desarrollo de hormigones reforzados con fibras pretensados*. Trabajo de final de máster, Escola de Camins, Ingeniería Civil y Ambiental.
- Muñoz, F. (2011). *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: Influencia de las propiedades de los hormigones reforzados con fibras, así como su poder aglomerante y su adherencia*. Trabajo de final de grado. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13552/PFG%20completo.pdf?sequence=1>
- Pan, Z. (2020, October). Effect of expansive agents on the workability, crack resistance and durability of shrinkage-compensating concrete with low contents of fibers. *ScienceDirect*, 259. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820317736?via%3Dihub>
- Pujadas, P. (2016). *Introducción al hormigón reforzado con fibras*. Seminario ieca. Retrieved from <https://www.coatz.org/wp-content/uploads/2016/12/5.-Hormigon-con-fibras.pdf>
- Pujadas, P. (2021). Correlación entre TCOD y desplazamiento axial en el ensayo Barcelona. *Research Gate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/263191010_Correlacion_entre_TCOD_y_desplazamiento_axial_en_el_ensayo_Barcelona
- Sun, W. (2001). The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. *ScienceDirect*, 31. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884600004798?via%3Dihub>
- Tixier, R., & Mobasher, B. (2003). *Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack. II: Comparison with Experiments*. Study. Retrieved from <https://www.nrc.gov/docs/ML1218/ML12185A197.pdf>

- Vivas, J. (2020). *Influencia del tipo de fibra en la resistencia al impacto de HRF*. Artículo. Retrieved from <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/b5cbeae8-7d61-4330-83fe-69d178f1e16a/content>
- Wang, L. (2021). Effect of Assembly Unit of Expansive Agents on the Mechanical Performance and Durability of Cement-Based Materials. *MDPI*. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/6/731>
- Wyrzykowski, M., Terrasi, G., & Pietro, L. (2020). Chemical prestressing of high-performance concrete reinforced with CFRP tendons. *EMPA*. Retrieved from https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa%3A21338/datastream/PDF2/Wyrzykowski-2020-Chemical_prestressing_of_high-performance_concrete-%28accepted_version%29.pdf
- Yoo, D.-Y. (2017). Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber reinforced concrete subjected to impact and blast. *Construction and Building Materials*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181731022X>