



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



ESCUELA DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

TRABAJO FINAL DE MASTER

# UHPC CON MULTIFISURACIÓN

Autor: D. Jesús Alcaraz Marín  
Director: D. Carlos Parra Costa

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

## AGRADECIMIENTOS

En mi primer lugar mi agradecimiento para el director de este proyecto D. Carlos Parra Costa por el aporte de sus conocimientos científicos, por el apoyo y por su dedicación.

En su segundo lugar a mis amigos, por haber estado ahí y por sus ánimos cuando más se necesitaban, Santiago, Vicente, David, Juanje, Antonio, Agustín y un largo etcétera, de veras, gracias.

A Isa y Carlos por su inestimable ayuda y conocimientos aportados durante la realización de los ensayos en el CTCOM.

También agradecérselo a mis compañeros de máster por su ayuda y por el interés mostrado a lo largo de la realización de este proyecto.

Y por último y más importante a mi familia, por su apoyo, ánimo e interés que me hicieron seguir adelante.

GRACIAS

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN AL TFM .....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.3. RESUMEN POR CAPÍTULOS .....	4
<b>CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>8</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	9
2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS HORMIGONES CON FIBRAS.....	10
2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES .....	14
2.3.1. FAMILIAS DE ECC.....	14
2.3.2. ECC AUTOCOMPACTANTES.....	14
2.3.3. ECC ALIGERADOS.....	18
2.3.4. ECO ECC.....	22
2.3.5. OTROS ECC.....	23
2.3.6. ECC CON DIFERENTES FIBRAS... ..	24
<b>CAPÍTULO 3: TEORÍA DE MICROFISURAS.....</b>	<b>33</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	35
3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	36
3.3. TEORÍA DE MICROMECAÑICAS.....	38
3.3.1. ANTECEDENTES .....	38
3.3.2. ESTADO ESTABLE DE ROTURA Y “STRAIN HARDENING.....	39

3.3.3. ROTURA DE GRIFFITH.....	42
3.3.4. MARGEN DE SEGURIDAD.....	44
<b>CAPÍTULO 4: MATERIALES Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>47</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	49
4.2. MATERIALES.....	50
4.2.1. CEMENTO.....	50
4.2.2. ÁRIDO.....	51
4.2.3. CENIZAS VOLANTES.....	51
4.2.4. FIBRAS.. .....	54
4.2.5. SUPERPLASTIFICANTE .....	55
4.3. DOSIFICACIÓN.....	56
4.4. PROCESO DE MEZCLA.....	58
4.4.1. PROBETAS.....	60
4.5. PROCESO DE CURADO.....	61
4.6. ENSAYOS REALIZADOS.....	62
4.6.1. ENSAYO A FLEXIÓN (TRES PUNTOS).....	63
4.6.2. ENSAYO A COMPRESIÓN.....	64
4.6.3. ENSAYO A FLEXIÓN (CUATRO PUNTOS).....	65
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>69</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	71
5.2. RESULTADOS A COMPRESIÓN Y DISCUSIÓN.....	72
5.3. RESULTADOS A FLEXIÓN Y DISCUSIÓN.....	76

5.4. COMPORTAMIENTO DÚCTIL Y DISCUSIÓN.....	80
5.5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	83
<b>CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>87</b>

## 1.Introducción

---

## **1.1. Introducción**

Con el objetivo de obtener el título de Máster de Ciencia y Tecnología de la Edificación en Arquitectura (CYTEA), D. Jesús Alcaraz Marín ha realizado el proyecto final de máster titulado “Hormigón de altas prestaciones con multisifuración”. Este trabajo ha sido dirigido por el profesor D. Carlos Parra Costa del Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Este Proyecto Final de Máster (PFC) consiste en el desarrollo de un hormigón de ultra altas prestaciones con un excelente comportamiento dúctil. Para ello se ha previamente se procedido a conocer el estado de las investigaciones actuales recogiendo los datos y ensayos realizados para proceder con el desarrollo de este trabajo.

Una vez realizado este estudio previo se procedió a realizar dosificaciones en laboratorio para, posteriormente (28 días y 90 días), conocer las propiedades desarrolladas en los términos relativos a resistencia a compresión, resistencia a flexión y ductilidad.

De la misma manera se extraen conclusiones fruto de las observaciones realizadas así como se dan unas líneas referidas a trabajos futuros a desarrollar.

## **1.2. Objetivos específicos**

El principal objetivo de este proyecto es el de conocer que parámetros influyen de manera significativa en el desarrollo de hormigones de altas propiedades mediante el estudio de las propiedades de mecánicas de los mismos.

También se plantea como un complemento para profundizar en el conocimiento de los hormigones de altas prestaciones el desarrollo de las teorías de micromecánicas y energía de fractura con el objetivo de modelar el comportamiento de fractura.

## **1.3. Resumen por capítulos**

El presente proyecto se divide en 5 Capítulos en los que se desarrollan los siguientes temas:

- El capítulo 2 se recoge el estado actual de las investigaciones relaciones con los hormigones de altas prestaciones centrándose en los reforzados con fibras buen comportamiento dúctil.
- En el capítulo 3 se trata de dar una visión general sobre las teorías de micromecánicas y el balance energético producido en la fisura. De esta manera se pretende conocer y desarrollar de un modo mecánico el comportamiento multifisurativo conociendo que factores lo generan y como poder implantarlo en los hormigones.



- En el capítulo 4 se explica la metodología seguida para la realización de este proyecto. Se explica la dosificación usada para la fabricación del hormigón de estudio así como se detallan los diferentes materiales usados. También se explica el procedimiento experimental usado y la normativa seguida.
- En el capítulo 5 se recogen las principales conclusiones extraídas de la realización de este proyecto final de máster. De la misma manera se provee de líneas para posibles trabajos futuros relacionados con hormigones dúctiles.

## 2. Estado del arte

## 2.1. Introducción

Los materiales de construcción pueden recibir diferentes designaciones en función del país. En realidad, el mundo es pequeños. Estamos usando los mismos materiales en todas las partes del mundo con diferencias prácticamente imperceptibles y nombres diferentes.

En este hilo encontramos el término alemán “Ultrahochfester Beton” que no tiene realmente el mismo significado que Hormigón de Ultras Altas Prestaciones (HUAP). “Hochfest” describe las condiciones internas del hormigón mientras que “Altas Prestaciones” se refiere a las características externas del material.

En los Estados Unidos, la definición de “High Performance Concrete” dada por la Administración Federal de Autopistas incluye ocho prestaciones: durabilidad a ciclos de hielo-deshielo, resistencia al decapado, resistencia a la abrasión, resistencia a la penetración de cloruros, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, fluencia y retracción.

Buscamos realizar las estructuras actuales con materiales con cuatro propiedades bien definidas:

- Resistencia
- Trabajabilidad
- Durabilidad
- Asequibilidad

Como se puede ver, los tres primeros términos de la lista coinciden con los ocho términos incluidos en la definición estadounidense. El último únicamente hace referencia al precio.

El término de altas prestaciones hace referencia a la mejora de alguna o todas de estas propiedades. El peso o la carga muerta son las cargas más representativas en el diseño de estructuras, consecuentemente, una mayor resistencia genera dos ventajas:

- Menos material
- Menos peso

De esta manera con la reducción de peso se genera una reducción de material y por ende una disminución de las cargas que la estructura tiene que soportar.

El desarrollo y el futuro de este tipo de hormigón dependen de poder vencer los dos obstáculos que tiene los cuales son el costo y la trabajabilidad.

El factor más influyente en la popularidad de este material es el costo, materiales con menos costo son más empleados en construcción. En 1850 y con la evolución y mejora en los procesos de fabricación del acero se consiguió que fuese más fácil y menos costoso su elaboración con lo que sus aplicaciones empezaron a proliferar. Así fue como se pensó que al incorporarlo a piezas estructurales de hormigón se mejorarían sus propiedades. Los hormigones de ultra altas propiedades probablemente necesiten un mayor avance en la tecnología de la construcción para poder aumentar su popularidad como material.

Consecuentemente, para poder usar plenamente las capacidades de los hormigones de altas prestaciones debemos desarrollar nuevas aplicaciones. La gran resistencia que poseen puede no ser necesaria si la queremos usar en los tipos estructurales existentes. Como ha ido sucediendo a lo largo de la historia, la necesidad de crear nuevas formas estructurales ha condicionado la aparición de nuevos materiales, y viceversa.

## 2.2. EVOLUCION HISTÓRICA DE LOS HORMIGONES CON FIBRAS

A día de hoy el hormigón reforzado con fibras es ampliamente usado, teniendo una producción anual cercana a 100 m<sup>3</sup>. Las principales aplicaciones de este tipo de hormigones son para elementos prefabricados y hormigones proyectados. Hasta ahora la mayor parte de la producción era destinada para aplicaciones “no estructurales” con la incorporación de las fibras para el control de retracción y fluencia.

Con objeto de aumentar la resistencia de materiales que son más débiles a tracción que a compresión empezaron a incorporarse fibras en su composición. Algunos ejemplos de estos materiales son los bloques de barro con paja o los ladrillos de adobe (una mezcla entre arena, arcilla y paja).

Uno de los primeros ejemplos de cemento reforzado es el fibrocemento cuyo proceso de creación fue inventado por Ludwig Hatschek en 1890. Este cemento se compone de un aglomerante inorgánico hidráulico o un aglomerante de silicato de calcio que se forma por la reacción química de un material silíceo y un material calcáreo reforzado con fibras orgánicas, minerales y/o fibras orgánicas sintéticas.

Sin embargo los primeros estudios serios sobre hormigón reforzado con fibras están datados a principios de 1960 (Romualdi y Batson, 1963, Romualdi y Mandel 1964) los cuales demostraron que la adición de fibra de acero reducía la fragilidad del hormigón. Este desarrollo ha continuado con la expansión a una gran variedad de fibras como las de cristal, carbón, sintéticas, fibras naturales y los últimos años híbridas que combinan tanto diferentes tipos de fibras o como de tamaños.

En los hormigones reforzados con fibras se observa un aumento en la tenacidad del material no es tanto es su comportamiento dúctil. La ductilidad es una medida de la deformación bajo tensión capacidad típicamente asociada a aceros pero no a hormigón. Aveston et al. (1971) y posteriormente Krenchel y Stang (1989) demostraron que se podía conseguir una ductilidad cientos de veces mayor que en un hormigón normal con fibras alineadas

De esta manera estos materiales, se pueden clasificar de manera separada a los FRC, atendiendo a los diferentes grados de ductilidad alcanzados. Naaman y Reindhart (2003) clasifican este material como HPRFCC (*High Performance Reinforcement Fiber Cementitious Composites*).

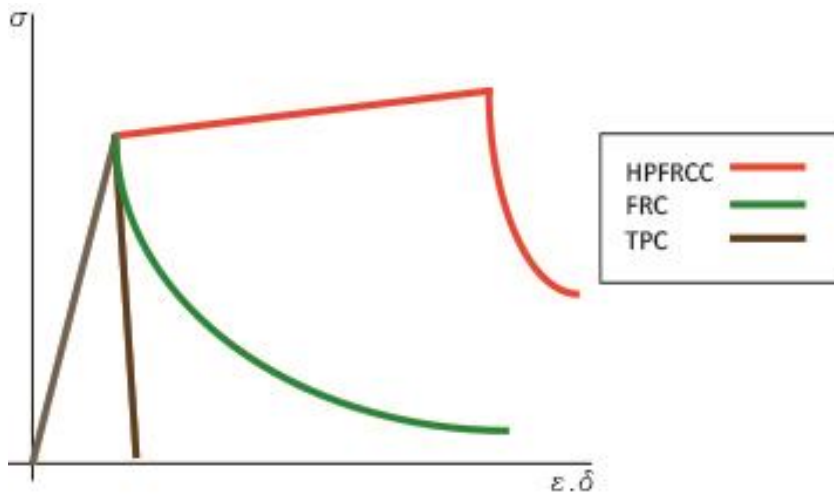


Ilustración 2.1 Curva tensión-deformación de los diferentes tipos de hormigón.

La Imagen 2.1 muestra de manera esquemática las diferencias entre la respuesta a tensión entre hormigón normal, FRC y HPRFCC. Como se puede ver en la imagen superior para el hormigón reforzado con fibras (FRC) y en comparación con el hormigón tradicional (TPC) la deformación después de la rotura (pico en la gráfica) está asociada con el ancho de apertura de la fisura. En la imagen se hace especial énfasis en la zona de transición de hormigón frágil (TPC) a casi frágil (FRC) o a dúctil (HPRFCC). La matriz cementicia de este tipo de hormigones es mucho más densa y compacta que la de los hormigones tradicionales debido a la ausencia de áridos con granulometrías grandes.

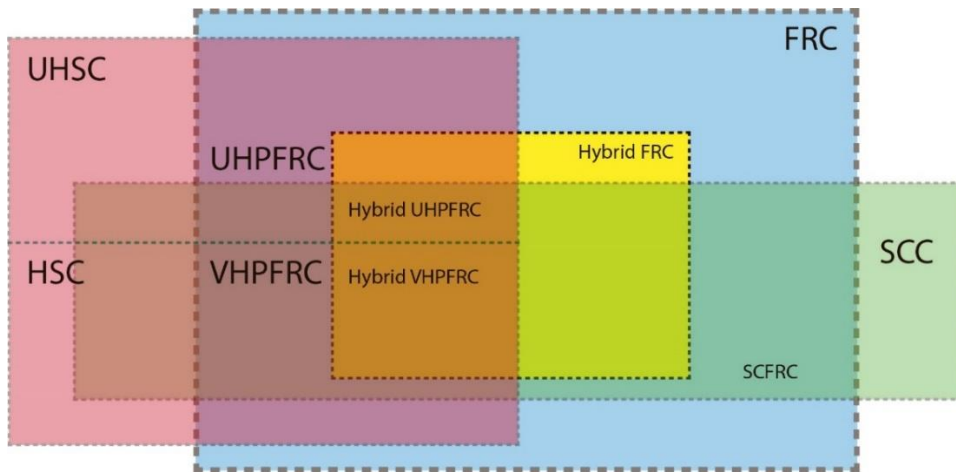


Ilustración 2.2 Familias de hormigones

Recientemente diversos investigadores de la Universidad de Michigan han desarrollado un Hormigón con alta ductilidad conocido por su siglas en inglés ECC (Engineered Cementitious Composite). Este tipo de hormigón presenta unas resistencias moderadas a flexión, entorno a los 5 MPa, y una alta ductilidad (Li, 1993; Fischer et al, 2003). El fundamento para conseguir estas propiedades está basado en crear sinergia entre fibras, matriz cementicia e interfaz entre árido-pasta siguiendo un modelo teórico de micromecánicas.

A diferencia con otros hormigones de altas prestaciones reforzados con fibras que trabajarían en la zona cercana de ELS (estado límite de servicio), los ECC se diseñan para trabajar en la zona inelástica por lo que la contribución de las fibras es efectiva incluso bajo cargas de servicio normales.

El nombre de ECC (engineered cementitious composites) fue adoptado por su desarrolladores (Li, 1993) con objeto de destacar la importancia de las micromecánicas en el diseño del mismo. En 2006 el comité técnico del RILEM decide darle un nombre más descriptivo SHCC (Strain Hardening Cementitious Composites) haciendo especial énfasis en su respuesta a cuando trabaja a flexión. Sin embargo JSCE (Japanese Society of Civil Engineers) prefieren nombrarlo como Hormigón Reforzado con múltiples microfisuras. En esencia tanto ECC, SHCC y HRMM es el mismo material

diseñados a partir de micromecánicas representando la misma tecnología de material.

## 2.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES

### 2.3.1. Familias de ECC

Los ECC pueden considerarse como una familia de materiales que engloban un amplio rango de resistencias a flexión y ductilidades las cuales son ajustadas en función de las demandas particulares de la estructura. Dentro de las familias se pueden hacer distinciones dependiendo de la funcionalidad de los mismos además de las inherentes a este material (ductilidad y multifisuración).

### 2.3.2. ECC Autocompactantes

Existen ECC autocompactantes diseñados para construcciones a gran escala que necesitan de hormigones que se consoliden in situ. Kong et al. (2003) desarrollaron un tipo de SCECC (self consolidating Engineered Cementitious Composite) optimizando los parámetros micromecánicos para controlar las propiedades en estado endurecido y los parámetros en la dosificación para controlar sus propiedades reológicas. En el desarrollo de este tipo de ECC, Kong et al. (2003) con objetivo de conseguir el estado de “strain hardening” y la multifisuración se prestó especial atención en lo relativo a micromecánicas en el diseño de la matriz cementicia, en la selección de las fibras y en las propiedades de la interfaz. Las propiedades reológicas de la matriz cementicia en estado fresco incluyen tanto la consistencia, la velocidad de escurrimiento y la autocompactabilidad obtenida con una combinación óptima de superplastificante y un espesante.

Tabla 2.1 Dosificación de Kong et al. (2003)

<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>Agua</b>	<b>HPMC</b>	<b>Superplastificante</b>	<b>Fibras (en fracción)</b>
1.0	0.5	0.3	0.013	0.04	0.01



En este estudio Kong et al. llegaron a la conclusión de que este ECC mostraba tanto las propiedades de autocompactabilidad en estado fresco como las propiedades de multifisuración en estado endurecido bajo el ensayo de flexión de cuatro puntos.

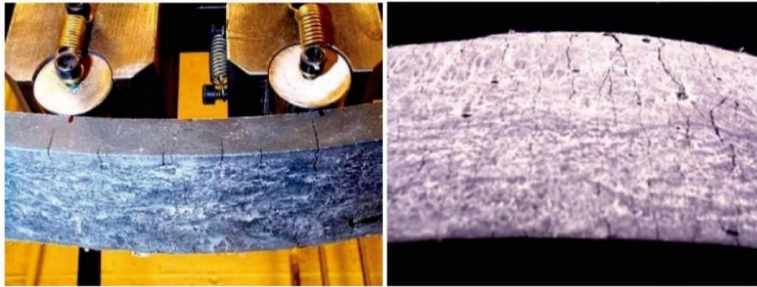


Ilustración 2.3 Probetas de ECC sometidas a flexión

Como se puede ver en la imagen superior el SCC ECC sometido a flexión de cuatro puntos presenta este comportamiento de multifisuración que le permite alcanzar altas cotas de ductilidad, alcanzando un desplazamiento en el centro de la pieza de hasta 10.3 mm (imagen inferior).

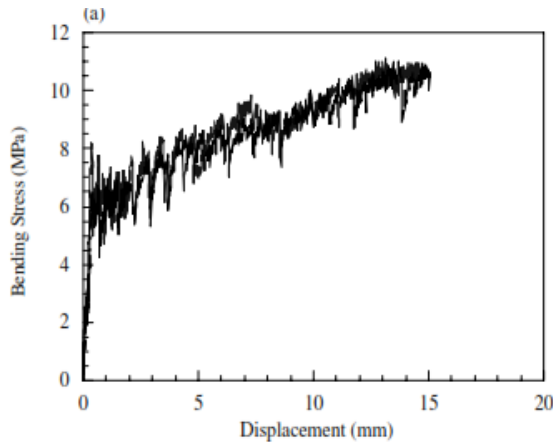


Ilustración 2.4 Gráfico de esfuerzo a flexión y desplazamiento.

Dentro de las posibilidades de diseño inherentes a los parámetros de las micromecánicas y la adaptabilidad de los ECC, Wang y Li (2006) consiguieron diseñar un hormigón que desarrollaba unas resistencias iniciales altas. La

necesidad de este ECC viene dada como una demanda real de las autoridades de tráfico de Michigan, las cuales, querían un material para reparación de sus carreteras. Debido a su alta ductilidad y escaso ancho de fisura que presenta, el ECC reúne las prestaciones necesarias para cumplir como material de reparación, en este sentido, exhibe una excepcional compatibilidad con la deformación del hormigón de la estructura. La alta resistencia a fractura y el comportamiento de multifisuración actúan como barrera ante el comportamiento inestable del hormigón fisurado eliminando posibles fallos por delaminación y “spalling”, fallos más habituales en las estructuras reparadas (Lim y Li, 1997).

Tabla 2.2 Dosificaciones de los hormigones estudiados por Lim y Yi. (1997)

Muestra	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Otros áridos (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Ceniza Volante (kg/m <sup>3</sup> )	Fibras de PVA (kg/m <sup>3</sup> )	Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )
SC01	906	724	-	350	90.6	26.0	13.9
SC19	863	690	41.4	334	86.0	26.0	13.3
HP08	893	893	-	292	-	26.0	6.3
HP09	848	848	54.0	278	-	26.0	5.9
OP08	583	467	-	298	700	26.0	15.0

SC01 y SC19 están elaboradas por cemento de endurecimiento rápido (Tipo S-30, Corea).

HP08 y HP09 están elaboradas con cemento Portland tipo III.

OP08 está elaborada con cemento Portland tipo I.

Los hormigones que exhibían una ganancia de resistencia inicial mayor son las muestras basadas en cemento Portland tipo III y en el cemento Tipo S-30, los cuales alcanzaron una resistencia de 21 MPa en las primeras 5 horas.

A diferencia con los anteriores, la muestra OP08 (clasificada por los autores con ECC normal) consigue alcanzar los 21 MPa a las 24 horas. Como se puede observar en la gráfica anterior, comparando la muestra con cemento de endurecimiento rápido con los cementos Portland tipo III, el primero empieza a mostrar resistencias con apenas 1 hora mientras que el segundo necesita 2 horas incluso con la ayuda de un acelerante. Con la reducción de la relación agua material cementante se consiguen resistencias iniciales altas, por el contrario, se genera una matriz mucho más densa y unas propiedades de

unión interfaciales más altas lo que disminuye potencialmente el comportamiento de multifisuración.

Muestra	SC19	HP09	OP08
<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>	24 a 3 h	26 a 4 h	18 a 16 h
	37 a 24 h	42 a 24 h	24 a 24 h
	60 a 28 días	53 a 28 días	65 a 28 días
<b>Resistencia a flexión (MPa)</b>	7 a 3 h	10 a 4 h	11 a 24 h
	14 a 24 h	12 a 24 h	15 a 28 días
	16 a 28 días	16 a 28 días	
<b>Resistencia a tracción (MPa)</b>	3.5 a 3 h	3.5 a 3 h	3.5 a 3 h
	3.5 a 24 h	3.2 a 5 h	3.0 a 24 h
	5.2 a 28 días	5.5 a 28 días	5.5 a 28 días
<b>Resistencia a tracción (%)</b>	>2.0	>3.0	>3.0
<b>Módulo de Young (GPa)</b>	20.8 a los 28 días	22.8 a los 28 días	21.0 a los 28 días

De este estudio realizado por Wang y Li se recogen en la tabla los resultados de los ensayos y las pruebas de resistencia obtenidas.

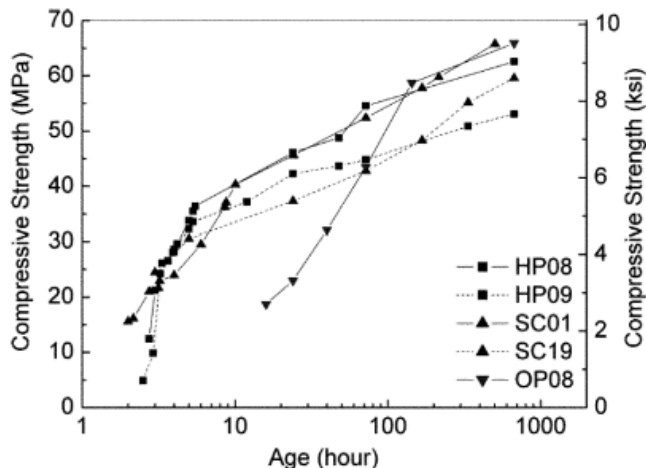


Ilustración 2.5 Evolución de la resistencia a compresión de diferentes tipos de hormigones (Wang y Li.)

### 2.3.3. ECC Aligerados

Para conseguir hormigón con una menor masa, hormigones ligeros, tradicionalmente se han usado áridos ligeros como: materiales tratados térmicamente (arcillas, pizarras...), cenizas volantes expandidas y cualquier material poroso de procedencia volcánica. Adicionalmente se pueden conseguir disminuciones de masa mayores con la adición de espumas a la mezcla, estas espumas poseen aire atrapado en su estructura en forma de minúsculas burbujas distribuyéndolas de manera homogénea en la matriz de cemento .

En la construcción de estructuras con relaciones resistencia/peso altas se requiere el empleo de hormigones con densidades bajas (entre  $1600 \text{ kg/m}^3$  y  $1760 \text{ kg/m}^3$ ) por ejemplo en la construcción de rascacielos o puentes con grandes luces.

Con objeto de obtener ECC ligeros Wang y Li (2003) elaboraron ECC con la adición de cuatro disminuidores de peso (tabla inferior, Wang y Li, 2003): aireantes, microsferas poliméricas vacías, perlita expandida y microburbujas de cristal obteniendo hormigones con un peso específico entre  $900$  y  $1600 \text{ kg/m}^3$  aunque Huang et al. (2013) establecen como límite para que un ECC se considere como aligerado una densidad de  $1850 \text{ kg/m}^3$ . Un alto volumen de agregados ligeros tiende a reducir la fuerza interfacial generada en la matriz cementicia lo que hace que el uso de las fibras de polivinilo de alcohol esté justificado debido a su capacidad para general enlaces fuertes.

Para poder mantener una resistencia a compresión elevada, debido a que la presencia de árido ligeros en la matriz actuaba como “fallas o imperfecciones internas” las cuales determinan la resistencia, Kong y Li (2003) llegaron a la conclusión de que para minimizar el impacto negativo de estos áridos ligeros es el de añadir árido con un tamaño mucho más pequeño. En los ECC las imperfecciones internas habituales se deben a la presencia de pequeñas burbujas de cerca de  $1 \text{ mm}$  de diámetro de aire, mientras que un tamaño de árido más pequeño es deseable desde el punto de vista de la trabajabilidad, áridos de tamaños mayores empeoran la dispersión de las fibras en la matriz.

Tabla 2.3 Aligeradores de peso para los hormigones estudiados por Kong y Li, (2003)

	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Rango de tamaño (µm)	Tamaño medio (µm)
<b>Glass Bubble S38</b>	380	10 – 80	40
<b>Glass Bubble S60</b>	600	10 – 60	30
<b>Micro-hollow-bubble MHK<sup>1</sup></b>	16.7	40 – 120	80
<b>Perlita Expandida</b>	1400	500 – 2000	1500

Polivinilo de acrilonitrilo

Nº Probeta	Cemento	Agua	Arena	Árido Ligero	HPMC	SP	Volumen de fibra
1	1	0.45	1.0	S38 0.05	0.0015	0.030	0.02
2	1	0.47	1.0	S38 0.10	0.0015	0.030	0.02
3	1	0.47	1.0	S38 0.20	0.0015	0.030	0.02
4	1	0.45	0.6	S60 0.40	0.0015	0.035	0.02
5	1	0.48	1.0	S60 0.20	0.0015	0.040	0.02
6	1	0.45	0	S60 0.50	0.0015	0.030	0.02
7	1	0.60	0	S60 0.50	0.0015	0.040	0.02
8	1	0.75	0	S38 0.50	0.0015	0.040	0.02
9	1	0.45	1.0	AE 0.02 <sup>1</sup>	0.0010	0.020	0.02
10	1	0.45	1.0	AE 0.04 <sup>1</sup>	0.0010	0.020	0.02
11	1	0.45	1.0	AE 0.06 <sup>1</sup>	0.0010	0.020	0.02
12	1	0.54	1.0	AE 0.06 <sup>1</sup>	0.0010	0.020	0.02
13	1	0.45	1.0	MHK 0.05	0.0010	0.030	0.02
14	1	0.45	1.0	MHK 0.10	0.0010	0.020	0.02
15	1	0.50	0.6 <sup>2</sup>	S38 0.15	0.0015	0.030	0.02

<sup>1</sup>Proporción de aireante por peso de cemento.

<sup>2</sup>Sustituido por micro perlita expandida.

Las resistencias tanto a compresión como a flexión desarrolladas por los ECC aligerados de Wang y Li (2003) eran las esperables. Se observó que para todas las muestras estudiadas con la adición de cualquier de los áridos aligerados se conseguía el estado de multifisuración inherente a los ECC. La combinación de áridos de tamaño grande con otros de tamaño menor hace que el impacto de los de mayor tamaño sobre el desarrollo de las resistencias mecánicas sea menor.

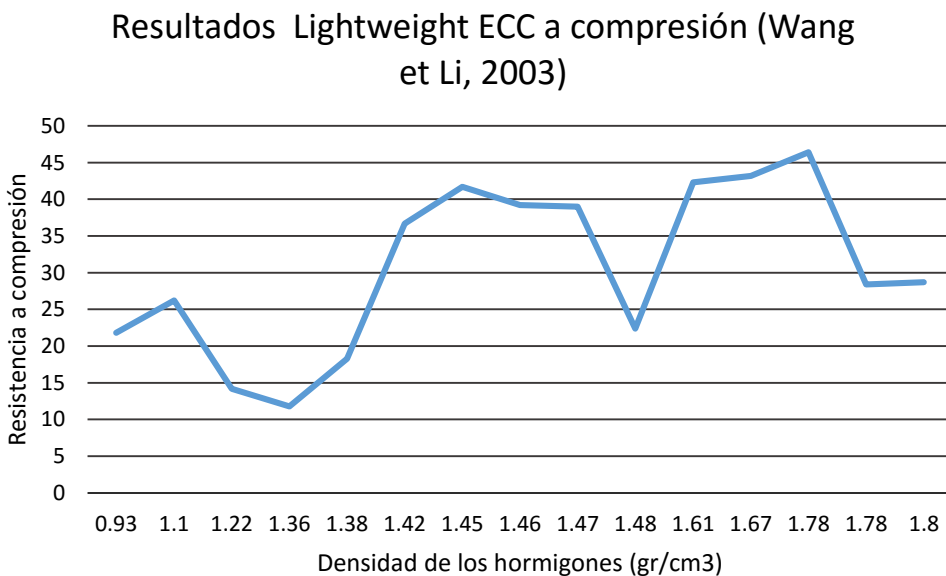


Ilustración 2.6 Resultados de los hormigones ligeros Wang y Li.

En el caso de no poder controlar una correcta dispersión de la matriz cementicia la presencia de aire favorece la dispersión de estos fillers aligerados.

Por otra parte una estructura cerrada en forma de “concha” es más deseable ya que asegura la separación de los huecos y disminuye la permeabilidad de los ECC.

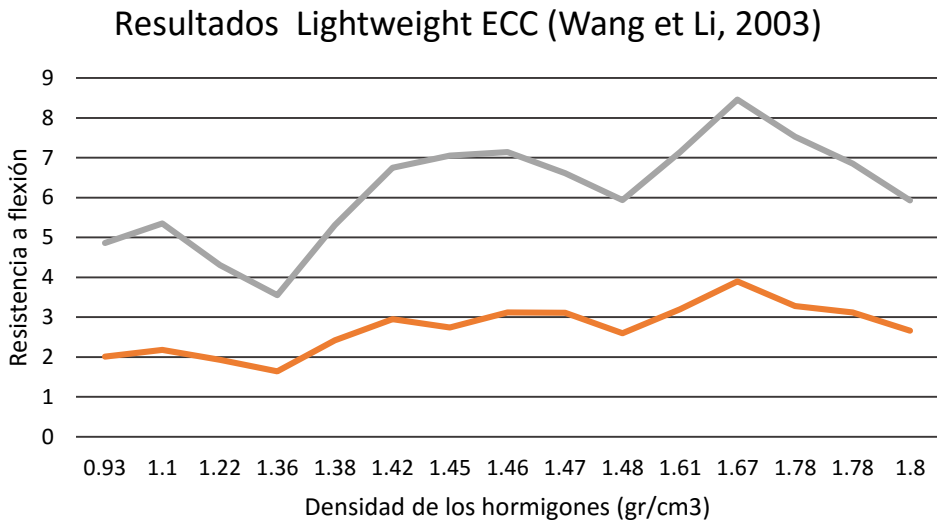


Ilustración 2.7 Resultados a flexión de los hormigones de Wang y Li.

### 2.3.4. ECO ECC

Se define el eco-hormigón o “Green Concrete” como un material en el que se sustituye parcial o totalmente parte del cemento, árido fino o árido grueso. El material usado para la sustitución puede proceder tanto de residuos industriales como de residuos de construcción. El objetivo del eco-hormigón es reducir y reutilizar materiales disminuyendo el impacto ambiental empleando técnicas de reciclaje para implementarlas en los procesos de creación del hormigón. Los tres conceptos principales detrás del eco-hormigón es la de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> inherentes a la construcción de viviendas (sobre todo en la fabricación del cemento), reducir el consumo de materias primas naturales como la caliza, la arcilla, la arena de río... y por último el prevenir el impacto visual terrestre al disminuir los vertederos de residuos debido a su incorporación al proceso de manufacturación del hormigón, mejorando así tanto la calidad del aire, como agua y del terreno.

La durabilidad de los materiales juega un rol importante en la sostenibilidad de las estructuras de hormigón. Los ECC constituyen un material muy interesante desde el punto de vista de la eco-construcción y de la sostenibilidad debido a su durabilidad elevada, ya que son diseñados para resistir altos cortantes y flexiones permaneciendo compatible con el hormigón tradicional en lo respectivo a resistencia a compresión y propiedades térmicas.

En este sentido Huang et al. (2013) estudiaron el desarrollo de eco-hormigones con la adición de residuos industriales. Usaron tres tipos de estos residuos sobrantes de mineral de hierro, cenizas volantes y esferas huecas (cenoesferas) de cenizas volantes. La adición de las cenoesferas reduce la densidad del hormigón, reduce la conductividad térmica y mejora la ductilidad de los hormigones con una pequeña reducción de la resistencia a compresión. Huang et al. (2013) consiguieron remplazar hasta un 89 % de la matriz sola cementicia por residuos consiguiendo que sus propiedades fueran similares a los ECC ultra dúctiles con la ventaja añadida de una conductividad térmica más baja.



Tabla 2.4 Composición de las FA usadas por Huang et al. (2013)

Composición (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
<b>FAC</b>	61.9	27.7	1.0	1.2	3.9	1.3	2.8

Como se puede observar en la ilustración 8 no se producen reducciones significativas de la resistencia a compresión con la sustitución de cenizas volantes para diferentes ratios FA (ceniza volante) / cemento.

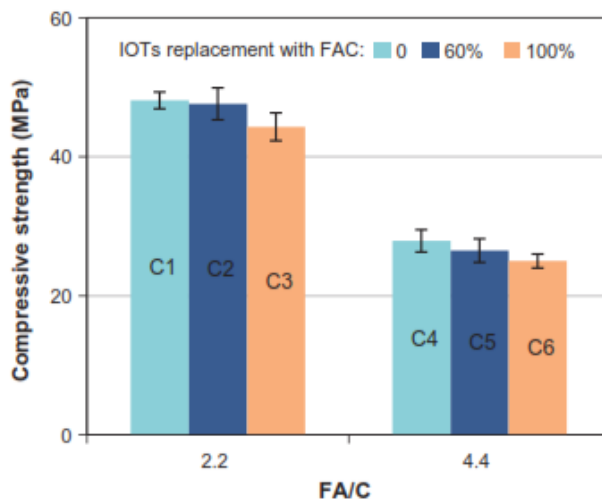


Ilustración 8 Desarrollo de resistencias en función de % de adición de FA.

### 2.3.5. OTROS ECC

Una de las principales ventajas de los ECC es que la posibilidad de diseñarlo con materiales locales, esto ha sido llevado a cabo en Japón (Kanda et al, 2006), Europa (Mechtcherine y Schulze, 2006), Sur África (Boshoff y Van Zijl, 2007) y Estados Unidos.

En el estudio realizado por Kanda et al (2006) en el que se remarcaba la ausencia de reportes sobre la posibilidad de fabricar los ECC en obra debido a la dificultad que representa. Realizaron una campaña experimental en la que se estudió la posibilidad de fabricarlos en dos estaciones diferentes

(primavera e invierno). De esta forma la única manera que existía de realizarlos era usar productores de materiales de la zona, en este caso, Kanto y Tokai (Japón), únicamente se usó el mismo cemento para todas las amasadas.

Tabla 2.5 Ensayos realizaos por Kanda (2006)

<b>Ensayo</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Tipo de Ensayo</b>
<b>Ensayos en estado fresco</b>	Temperatura en estado fresco	-
	Unidad de peso por volumen	JIS A 1116
	Contenido en aire	JIS A 1128
	Asentamiento	JIS A 1101
	Flujo de Asentamiento	JIS A 1150
<b>Ensayos de compresión</b>	Resistencia a compresión	JIS A 1108
	Módulo Elástico	JIS A 1149
<b>Ensayos de tracción</b>	Resistencia de tracción y capacidad de deformación	Tracción en llave Tracción en prisma
<b>Ensayos a flexión</b>	Resistencia a flexión y capacidad última de deformación	JCI-SC3-2005

Como se puede observar en la tabla todos los ensayos se han realizado conforme a las normas japonesas. Como resultado de estos test Kanda et al. (2006) concluyeron que la producción de ECC a gran escala para su uso directo en obra era viable. En los hormigones obtenidos por ambos se llegaron a conseguir propiedades mecánicas y fluidez similares a las obtenidas en su fabricación en laboratorio.

### 2.3.6. ECC con diferentes fibras

Como se puede observar a los largo de la literatura consultada la consecución de un ECC no depende únicamente de la adición de fibras de PVA en su composición, como muestra la nomenclatura, la cual se refiera al ECC como PVA-ECC (Victor C. Li, 2003), siendo posible su realización con otro tipo de fibras.

Victor C. Li et al (1996) estudiaron la influencia de los tratamientos de plasma en fibras de polietileno y de cómo interactuaban estas con la matriz cementicia a partir de los cambios generados en la interfaz.

Tabla 2.6 Propiedades de las fibras usadas por Li

<b>L<sub>f</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>d<sub>f</sub></b> <b>(μm)</b>	<b>E<sub>f</sub></b> <b>(GPa)</b>	<b>V<sub>f</sub></b> <b>(%)</b>	<b>g</b>
12.7	38	120	2	2

Con la adición de un 2 % de fibras en volumen se observaron ductilidades entre el 5.6 % y el 6.75 % lo que lo convierte en apto para una gran variedad de aplicaciones en la construcción y para la industria del transporte. Las probetas bajo la investigación realizada por Victor C. Li et al (1996) consistían en cemento Portland tipo I, humo de sílice y agua con la adición de fibras en la siguiente proporción:

Tabla 2.7 Dosificación usada por Li

<b>Cemento</b>	<b>Humo de sílice</b>	<b>Agua</b>	<b>Fibras de PE</b>
1	0.2	0.27	2%

Con la adición de estas fibras tratadas por plasma se alcanzaron resistencias a flexión entre 5.2 y 5.9 MPa para las fibras tratadas como se puede observar en la tabla siguiente.

Tabla 2.8 Resultados a flexión obtenidos por las fibras con y sin tratamientos de plasma

<b>Tratamiento de plasma</b>	<b>σ<sub>cu</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>τ</b> <b>(MPa)</b>	<b>τ promedio</b>
<b>Sin tratamiento</b>	5.1	0.76	0.63
	4.1	0.61	
	4.2	0.63	
	3.6	0.54	
<b>Ar</b>	5.8	0.82	0.76
	4.7	0.70	
	4.8	0.72	
<b>CO<sub>2</sub></b>	5.5	0.82	0.83
	5.9	0.88	

	5.2	0.78	
<b>NH<sub>3</sub></b>	5.8	0.87	0.85
	5.5	0.82	

$\sigma$  Resistencia a flexión.

$\tau$  Resistencia de la interfaz.

A través de los resultados obtenidos modificando los parámetros de la interfaz mediante el tratamiento por plasma de las fibras se produce una mejora tanto en la resistencia a flexión.

Takashima et al. (2003) estudiaron las propiedades mecánicas de hormigones fabricados mediante moldeo por extrusión con refuerzo de fibras de polipropileno (PP). Se demostró que mediante este método la cantidad de fibras determinada experimentalmente coincidía con la calculada por el método teórico de las micromecánicas. El moldeo por extrusión tiene gran potencial en la producción de hormigones reforzados con fibras con altas prestaciones comparado con los métodos de fabricación convencionales. Las dos ventajas más notables proporcionadas por este método son la porosidad reducida debido a la compactación mecánica y la posibilidad de obtener hormigones con las fibras alineadas según una dirección. La menor porosidad conduce a un incremento de la resistencia a compresión y a un aumento de dureza de la matriz. Además, la orientación de las fibras puede mejorar las propiedades mecánicas de los hormigones en la dirección de la extrusión. Una de las maneras más efectivas para mejorar la ductilidad de los compuestos de hormigón es el uso de del fenómeno de multifisuración. La multifisuración produce un pseudo endurecimiento de la probeta caracterizado por un incremento en la capacidad de carga después de la aparición de la primera fisura.

Shah y Shao (1994), Shao et al. (1995) y Akkaya et al. (2000) vieron que los materiales compuestos por cemento reforzados con fibras mediante extrusión mostraban el comportamiento inherente a los ECC de pseudo endurecimiento. Sin embargo no se ha llegado a desarrollar ningún modelo teórico para el diseño de composites reforzados por fibras mediante extrusión.

Tabla 2.9 Dosificaciones de Takashima et al. (2003)

<b>Cemento Portland Tradicional</b>	<b>Micro sílice</b>	<b>Fibras minerales</b>	<b>Metil celulosa</b>	<b>Agua</b>	<b>Pasta</b>
1.00	0.64	0.05	0.06	0.77	0.05

Con esta dosificación Takashima et al. (2003) consiguieron una resistencia límite última a flexión de 9.0 MPa y una capacidad de deformación entorno al 1%. Esto se consigue gracias a un diseño aproximado basado en las micromecánicas parametrizando tanto las propiedades mecánicas de las fibras alienadas como su volumen crítico para poder conseguir el estado de pseudo endurecimiento.

El uso de las fibras de polipropileno para la consecución de hormigones de altas prestaciones con desarrollo de ductilidades elevadas produce ECC con costes menores que el tradicional ECC o PVA-ECC fabricado con fibras de policloruro de vinilo que tiene un coste elevado. Se ha demostrado que se puede conseguir un producto de muy altas prestaciones con una adición mínima de la cantidad de fibras.

La principal diferencia en las fibras de PVA y las de PP es que las primeras llevan un tratamiento superficial consistente en una capa de aceite lo que conlleva a una reducción de las propiedades de enlace lo que provoca una mejora de la ductilidad. Por el contrario las fibras de polipropileno las fuerzas de enlace a lo largo de la fibras mejoran este comportamiento.

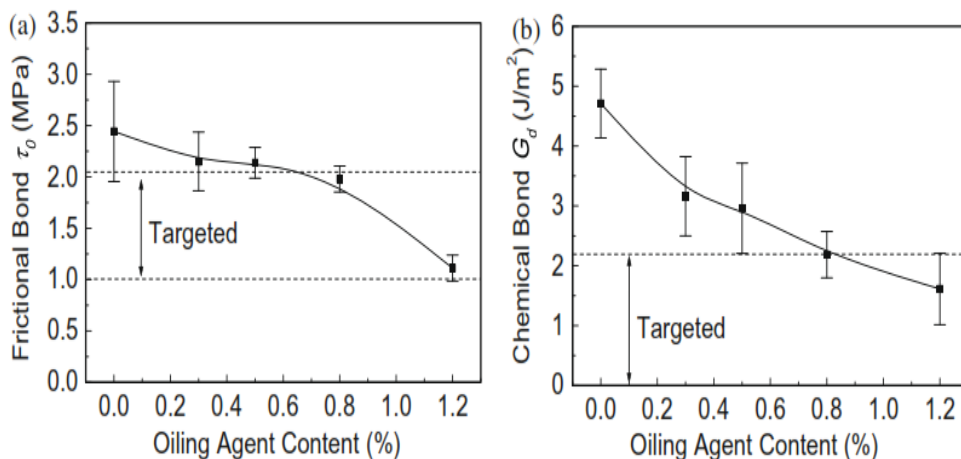


Ilustración 2.9 Propiedades de las fibras de PVA en función del porcentaje de tratamiento superficial de aceite.

Yang y Li (2009) estudiaron la manera de optimizar la composición de los hormigones para conseguir la máxima ductilidad posible usando tanto fibras de PVA como de PP.

Tabla 2.10 Dosificaciones estudiadas por Yang y Li. (2009)

Cemento ( $kg/m^3$ )	Ceniza Volante ( $kg/m^3$ )	Agua ( $kg/m^3$ )	Humo de sílice ( $kg/m^3$ )	Fibras de PP ( $kg/m^3$ )
412	1154	636	6.6	18

El incremento de la resistencia de la fibra a lo largo de su superficie, en el caso de las fibras de polipropileno, con un aumento de la capacidad de fricción, es una manera eficiente de mejorar la ductilidad de los hormigones. La débil fuerza de unión de las fibras de polipropileno ordinarias se debe a su baja energía superficial (características hidrofóbicas) y a su superficie poco rugosa. Como se ha comentado previamente, el tratamiento con plasma puede mejorar las características superficiales de las fibras de PP y por tanto mejorar su capacidad de enlace interfacial.

Yang y Li (2009) observaron que el control de las interacciones entre fibra, matriz de cemento y la interfaz generada entre ambas es la clave para optimizar el comportamiento del compuesto cementante. En la imagen se

puede observar el comportamiento a flexión de los hormigones estudiados por Yang y Li adicionados con fibras de PP exhiben una ductilidad elevada.



Ilustración 2.10 ECC con fibras de PP

La resistencia a compresión de 95 MPa fue obtenida por Kamal et al (2007) en el estudio de reparaciones de vigas de hormigón armado aplicando una capa superficial de UHPHCC (Ultra High Performance Strain Hardening Cementitious Composite) siendo esta nomenclatura otra manera de llamar al ECC. Li et al (1993) obtuvieron valores de ductilidad cercanos al 8 % en un estudio en el que se explica la interconexión entre las micromecánicas y la estructura del material así como de la importancia de estas para conseguir materiales con las propiedades que queramos. La característica común observada en los ECC es que todos poseen una ductilidad en torno a las 1000 veces mayor (Li, 1993; Li, 1998; Li y Kanda, 1998) que los hormigones tradicionales reforzados con fibras.

Aunque es cierto que en la mayor parte de los artículos considerados en la elaboración de este estudio consideran al ECC como PVA-ECC, haciendo referencia a las fibras de polivinilo de alcohol que llevan, otras fibras también

son usadas para la consecución de hormigones con ductilidades altas atendiendo a los parámetros de micromecánicas. La elección del tipo de fibras dependerá de las características de las mismas (mecánicas, diámetros y características superficiales) y sus resultados sobre los ECC en lo relativo a propiedades mecánicas, durabilidad, sostenibilidad y precio.

Tabla 2.11 Propiedades mecánicas de los ECC de Li.

<b>Resistencia Compresión (MPa)</b>	<b>Resistencia a rotura de primera fisura (MPa)</b>	<b>Resistencia a tracción (MPa)</b>	<b>Resistencia a tracción (%)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistencia flexión (MPa)</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
20 – 95	3 – 7	4 – 12	1 – 8	18 – 34	10 – 30	950 – 2300



### 3. TEORÍA DE MICROFISURAS

### **3.1. Introducción**

Aunque puede parecer que el diseño de estructuras y el estudio de las micromecánicas son dos campos de estudio alejados entre sí, con el desarrollo de los hormigones de altas prestaciones estos dos campos pasan a estar conectados y a tener un elemento en común: los materiales. El desarrollo de nuevos materiales incorpora un importante marco teórico en las fases tempranas de su concepción. De esta forma la industria de la construcción se va dotando de nuevas tecnologías que mejoran la durabilidad y seguridad de las estructuras.

Tradicionalmente el desarrollo y estudio de las estructuras recae sobre el ingeniero estructural el cual trata de diseñarlas con los materiales dados.

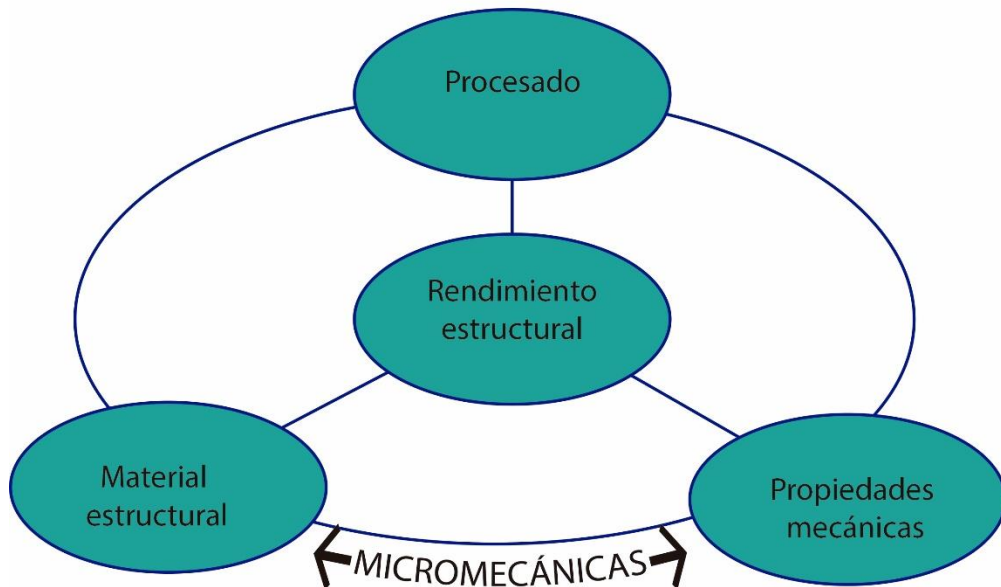


Ilustración 3.1 Leitmotiv de las micromecánicas

### 3.2. Características generales

La característica más importante de los ECC es su alta ductilidad bajo esfuerzos de flexión representados por una curva tensión-deformación generada en un test de flexión pura en ensayos de cuatro puntos. Como puede apreciarse en la figura XX el comportamiento del material muestra un punto característico al final de la etapa elástica debido a la aparición de la primera microfisura. Posteriormente se incrementa ligeramente la capacidad de carga debido a la respuesta por deformación-endurecimiento, esto es, un incremento de la deformación bajo tensión (el endurecimiento volumétrico que se produce debido a la aparición del gran número de multifisuras es opuesto a la apertura localizada de una única fisura) acompañado de un incremento de la carga.

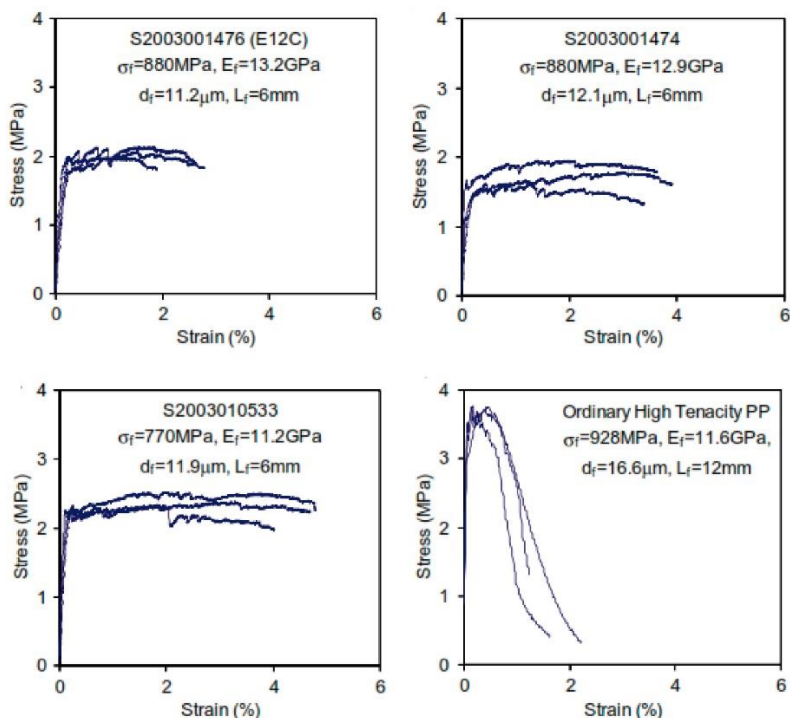


Ilustración 3.2 Gráficas de tensión - deformación típicas de un ECC

El fallo final de las probetas de hormigón ocurre cuando las microfisuras forman un plano de fractura. Más allá de este pico de carga, los ECC no son muy diferentes de los hormigones reforzados con fibras tradicionales, mostrando la misma respuesta de bajada de la tensión. La alta ductilidad bajo tensión es un gran valor en la mejora de los estados límite últimos en términos de carga estructural y capacidad de deformación. De esta manera, los ECC ofrecen mejoras en seguridad estructural.

Para conseguir que el compuesto alcance una gran ductilidad es necesario que se genere la microfisuración. Para Victor C. Li (2007) a partir de la deformación debida a la primera fisuración, aproximadamente un 0.01%, y el 1%, la apertura de la microfisura aumenta de tamaño desde 0 μm hasta 60 μm. Las cargas que se produzcan después de la deformación del 1 % provocaran la aparición de más microfisuras generando a su vez el estado de rotura estable. Esta característica, que es vital importancia para la durabilidad

tanto del material como de la estructura, se consigue mediante el diseño del hormigón a través de las micromecánicas.

El ancho de fisura generado en el estado estable de rotura, para Li (2003) es de 60  $\mu\text{m}$ , es independiente del tipo de carga (tracción, flexión o cortante), tamaño de la estructura y geometría así como de la cuantía de armadura que exista en la sección, eso tiene un gran impacto tanto el vida de servicio de la estructura, el tamaño máximo de los elementos, en parámetros económicos y en la estética.

### **3.3. Teoría de Micromecánicas**

#### **3.3.1. Antecedentes**

La teoría de micromecánica empezó a desarrollarse en el campo de los materiales cerámicos reforzados con fibras por Marshal et al. (1985), Spearing y Zok (1993) y Evans et al. (1994), aunque estos estudios estaban centrados en los materiales con las fibras orientadas en una dirección.

Marshall et al. (1985) observaron que la tensión generada durante la rotura de la matriz cementicia (reflejado como la primera desviación en la curva tensión-deformación) debe ser independiente del tamaño de la pieza, en este sentido, la matriz de los compuestos cerámicos sería más parecida a los metales en cuanto a comportamiento a flexión se refiere. Los cambios energéticos que ocurren durante el proceso de carga definen el comportamiento de crecimiento de las fisuras.

Spearing y Zok (1993) vieron que esta desviación en la curva tensión-deformación se manifestaba en una reducción del módulo de Young debido al incremento de la tensión, acompañado de una deformación permanente así como cambios en las propiedades de transporte influyendo notablemente en las propiedades térmicas. En este punto coincide con Li (1993) concluyendo que estos efectos son importantes para aplicaciones estructurales.

En el estudio y análisis de las microfracturas producidas en los materiales reforzados con fibras, el efecto de deslizamiento de las mismas es esencial.

Evans et al. (1994) estudiaron el efecto producido por la separación de la matriz cementicia durante la fisuración y su efecto en las zonas cercanas a la misma en lo relativo al posible deslizamiento de las fibras y su contribución al comportamiento bajo flexión. Con los resultados obtenidos consiguieron proponer un modelo, con los principios propuestos por Hutchinson y Jensen (1990), que teniendo en cuenta estos parámetros modelizaba los efectos producidos por la rotura y el estrés generado en la matriz cementicia en materiales con fibras orientadas.

### 3.3.2. Estado estable de rotura y endurecimiento por deformación

Uno de los fenómenos asociados y generados con la multifisuración de los compuestos cementicios el endurecimiento por deformación o “strain-hardening”. La explicación de este fenómeno (Li y Wu. 1992) se da considerando una probeta sujeta a una carga de tracción uniaxial. A medida que la carga aumenta, las fisuras existentes en la matriz cementicia (generalmente la de mayor tamaño y perpendicular a la dirección de la carga) puede propagarse por toda la sección. La rotura de la matriz puede ser estable o inestable dependiendo de las fisuras iniciales así como de la armadura que tenga. La aparición de fisuras visibles a simple vista está asociada a la rotura inestable de la matriz cementicia. Para evitar que se produzca este comportamiento inestable de rotura las fibras de refuerzo deben compartir esta carga trabajando conjuntamente a lo largo de las fisuras. De esta manera las fibras transmiten la carga a la matriz cementicia. Si suficiente carga es transferida, la matriz cementicia vuelve a fisurar repitiéndose el proceso hasta que la matriz rompe debido a la existencia de múltiples fisuras. El esfuerzo tirante de las fibras en las fisuras y las existentes en el grueso de la matriz cementicia configuran un compuesto que puede exhibir una mayor deformación que la matriz cementicia por si sola.

Este fenómeno fue observado en los estudios realizados en materiales cerámicos reforzados con fibras orientadas según una dirección (Marshal et al. (1985), Spearing y Zok (1993) y Evans et al. (1994)).

La diferente disposición de las fibras influye de manera considerable en la consecución la multifisuración. De esta manera de los estudios realizados en materiales cerámicos con las fibras orientadas se ve que para que las fibras cumplan con su función de una manera correcta deben cumplirse que, en la zona de la fractura deben existir fibras suficientes y que tengan la resistencia necesaria para poder transmitir la carga a la matriz cementicia, de otra forma, la pieza fallaría por rotura frágil. En el caso de compuestos reforzados con fibras desorientadas además de los dos requisitos para las fibras alineadas se le suma el que deben de estar embebidas en la matriz de cemento una longitud suficiente.

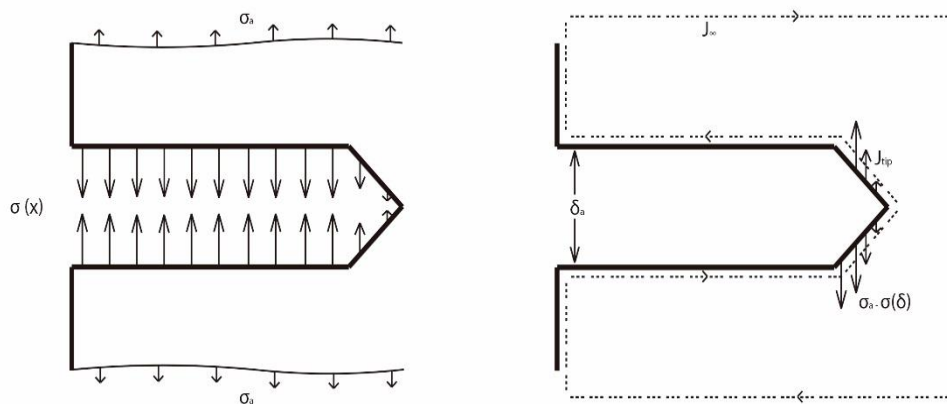


Ilustración 3.3 Estado de rotura estable. Izq Rotura normal por esfuerzo externo y patrón de rotura. Dcha. Problema equivalente debido a Marshall y Cox (1988) modelizando los esfuerzos con J-integral en el contorno.

La imagen anterior muestra la propagación de la rotura debida a una carga externa y constante  $\sigma_a$ . En la imagen de la izquierda se observa como la carga permanece constante hasta el frente de propagación de la fisura. Esto es debido a que las fibras transmiten de manera uniforme de un lado a otro de la fisura actuando como puente la carga externa. En el frente de fractura la carga aumenta desde 0 hasta el valor máximo.

Como es obvio, el ancho de la fisura está relacionado directamente con la tensión existente en la fractura. De esta forma donde la tensión sea constante el ancho de fisura será el mismo.

Marshall y Cox (1988) propusieron una ecuación que ilustra el proceso de rotura estable. Esta ecuación se consigue al emplear un paso independiente, teniendo en cuenta las propiedades de la fractura, llamada J-integral<sup>1</sup>.

$$J_{tip} = \sigma_a \cdot \delta_a - \int_a^{\delta_a} \sigma(\delta) \cdot d\delta$$

Ecuación 3.1

La parte a la derecha de la ecuación del igual se puede interpretar como la energía complementaria la cual se puede ver en la curva  $\sigma$ - $\delta$ . Esta energía, gráficamente, se corresponde con el área sombreada de la imagen inferior.

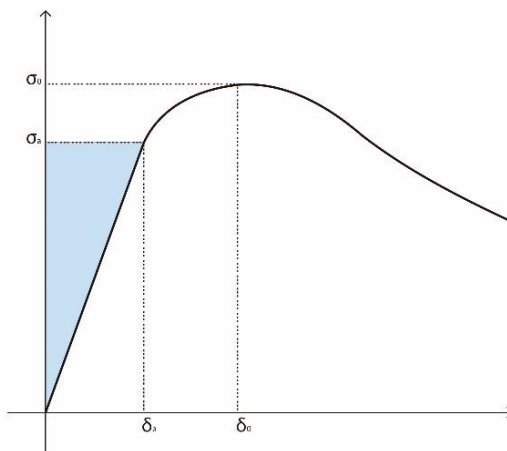


Ilustración 3.4 Diagrama donde se muestra gráficamente lo calculado en la Ecuación 1

Victor C. Li (2007) calcula esta  $J_{tip}$  (resistencia a rotura de la matriz cementicia en el frente de fisura) como:

$$J_{tip} \approx \frac{K_m^2}{E_m}$$

Ecuación 3.2

---

<sup>1</sup> La integral J es un método usado para calcular la energía que se da por unidad de área fracturada. Este método fue desarrollado por Cherepanov (1967) y Jim Rice (1968), el cual interpreta esta energía como un contorno (llamado J) independiente, el cual rodea la fisura.



donde  $K_m^2$  es la resistencia a rotura de la matriz cementicia y  $E_m$  es el módulo de Young.

De la misma manera en términos de resistencia se debe cumplir que:

$$\sigma_a \leq \sigma_0$$

Ecuación 3.3

donde  $\sigma_a$  y  $\sigma_0$  son la resistencia a rotura y la máxima capacidad de transmisión de carga de la fibra en cada plano potencial de rotura respectivamente. Esta ecuación asegura el inicio de la formación de las microfisuras en las zonas con fisuras iniciales después de que la carga de flexión exceda la capacidad de transmisión de las fibras.

Para que se produzca este “endurecimiento por deformación”, consiguiente al estado de rotura estable la ecuación de energía debe satisfacer:

$$J'_b = \sigma_0 \cdot \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) \cdot d\delta \geq J_{tip} \approx \frac{K_m^2}{E_m}$$

Ecuación 3.4

Una vez se inicia la rotura esta ecuación es la que nos proporciona el modo de propagación de las fisuras. El intercambio energético que se produce durante la propagación de la rotura entre la carga entrante y la energía que es absorbida por las fibras que cosen la fisura hace que se cumpla la ecuación del balance energético y por tanto se genere este estado de multifisuración. Cuando este balance energético no se cumpla, el resultado es una localización de las fracturas como en el caso de los FRC y la terminación del proceso de multifisuración.

### 3.3.3. Rotura de Griffith

Esta manera de rotura por localización en una zona se llama “rotura de Griffith” y es la que se produce en los hormigones reforzados con fibras tradicionales.

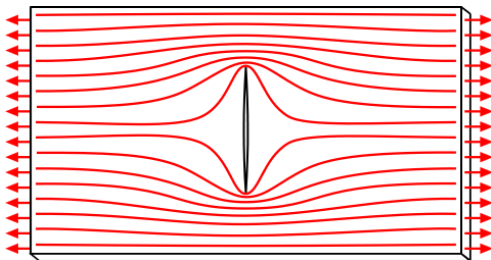


Ilustración 3.5 Patrón de rotura de Griffith, se observa como las líneas de tensión se agrupan en los extremos de la rotura aumentando la tensión existente en esa zona.

La mecánica de fractura fue desarrollada por el ingeniero Alan Arnold Griffith durante la Primera Guerra Mundial para poder explicar el fallo de los materiales frágiles. Griffith observó que la baja resistencia a fractura obtenida en sus experimentos con vidrios no podía ser una propiedad independiente del material, si no, que era debida a la presencia de pequeñas roturas microscópicas en la matriz del material.

En materiales dúctiles e incluso en materiales que parecen frágiles, en el extremos de toda fisura se desarrolla una zona de plastificación. Cuando la carga aplicada aumenta, la zona plástica crece en tamaño hasta que la fisura progresa descargándose el material a ambos lados de la fisura ya progresada. De esta en el ciclo de carga y descarga se genera, cerca de la fisura, una disipación de energía en forma de calor y plastificación. Para materiales frágiles Griffith propone añadir un término disipativo al balance energético. De esta manera se podría decir que para hacer crecer la fisura en un material dúctil hace falta más energía que en un material frágil.

Para poder obtener la multifisuración debemos evitar que se produzca los efectos de la fractura de Griffith. Esto es especialmente complicado debido a que los hormigones per se ya presentan fallos en su matriz como es la porosidad.

La manera de prevenir los efectos de la fractura de Griffith es alterando la forma de propagación de las fisuras para que la fisura solo se extienda mientras la apertura de la misma sea constante en cualquier localización.

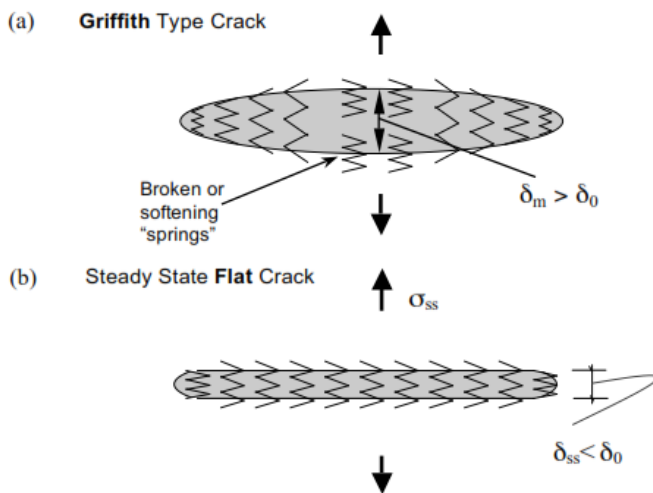


Ilustración 3.6 Balance energético de los tipos de fisuras. Arriba fisura de tipo Griffith y abajo rotura que se produce en multifisuración.

### 3.3.4. Margen de seguridad

En la ecuación 3.4 la parte izquierda de la inecuación contiene los términos que hacen referencia tanto a las propiedades de la fibra como de la interfaz fibra-cemento, por otro lado, la parte de la derecha de la inecuación contiene los términos dependientes de la matriz cementicia.

El signo de igualdad de la ecuación 4 (V. C. Li, 2007) es debido a la suposición de que los defectos iniciales de la matriz y la distribución del volumen total de fibras es uniforme en todo el compuesto. En realidad es imposible que sea uniforme esta distribución debido tanto a la dosificación como al proceso de mezcla.

Esta variabilidad hace necesario la incursión de un margen más amplio entre el lado izquierdo y el derecho explicando la inclusión del símbolo de inecuación. Kanda y Li (2006) estudiaron el margen necesario para poder crear unas propiedades de tensión suficientes.

Estos índices estudiados por Kanda y Li (2006) fueron evaluados en cuatro compuestos diferentes sometidos a ensayos uniaxiales de tensión. La

correlación entre la intensidad que se produce durante el endurecimiento por deformación y los índices dan estos márgenes de diseño para que se produzca el comportamiento citado anteriormente en los ECC:

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_a} > 1.3; \frac{J'_b}{J_{tip}} > 2.7$$

Ecuación 3.5

## 4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

## **4.1. Introducción**

En este capítulo se explican los componentes, instrumentos y procesos usados a lo largo del desarrollo del proceso experimental de este Proyecto Final de Master. El proceso seguido es el mismo que para poder hacer el hormigón:

1. Materiales
2. Dosificación
3. Proceso de mezcla
4. Proceso de curado
5. Ensayos realizados en estado endurecido

Tanto la dosificación como el proceso de mezcla elegidos son resultado de una amplia revisión bibliográfica de estudios previos realizados. La selección de los componentes se ha hecho atendiendo a la posibilidad de su obtención en empresas de la Región de Murcia.

## 4.2. Materiales

Los datos de los materiales empleados exponen a continuación, de la misma manera también se presenta la curva granulométrica del árido usado en la dosificación del hormigón.

### 4.2.1. Cemento

El cemento empleado fue proporcionado por cementos La Cruz S. L. cuya fábrica se encuentra en Abanilla (Murcia).

Tabla 4.1 Propiedades del cemento usado

Cemento		
Características		
Componentes	<b>Clinker (%)</b>	80 - 94
	<b>Cenizas Volantes (%)</b>	6 - 20
	<b>Componentes minoritarios(%)</b>	0 – 5
Químicas	<b>Sulfatos (%)</b>	≤ 4.0
	<b>Cloruros (%)</b>	≤ 0.10
Físicas	<b>Principio de fraguado (min)</b>	≥ 45
	<b>Final de fraguado (min)</b>	≤ 720
	<b>Expansión (mm)</b>	≤ 10.0
Mecánicas	<b>Resistencia a compresión 2 días (MPa)</b>	≥ 20.0
	<b>Resistencia a compresión 28 días (MPa)</b>	≥ 52.5



Ilustración 4.1 Saco de cemento usado

### 4.2.2. Árido

El árido usado en el desarrollo de este tipo de hormigones es, y a diferencia con los vistos en los estudios previos, de origen calizo. Esta diferencia es de gran importancia, en los artículos consultados, los áridos empleados son silíceos, pudiendo colaborar este carácter con el desarrollo de resistencias. De esta manera se consigue implementar un tipo de árido predominante en la Región de Murcia.



Ilustración 4.2 Fotografía del árido empleado

### 4.2.3. Cenizas Volantes

Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

Los análisis mineralógicos se hicieron mediante difracción de rayos X (DRX). Para la operación del equipo se utilizó radiación  $\text{CuK } \theta$  (1.542 Å) en las siguientes condiciones para todos los análisis: rango de barrido de 10 a 80° 2 $\theta$ , para un paso de 0.03° 2 $\theta$  y un tiempo de incidencia de 3 segundos por paso. Las muestras secadas a 110°C y pulverizadas a tamaños de partícula por debajo de 50 $\mu\text{m}$ , fueron montadas sobre porta-muestras de aluminio. La



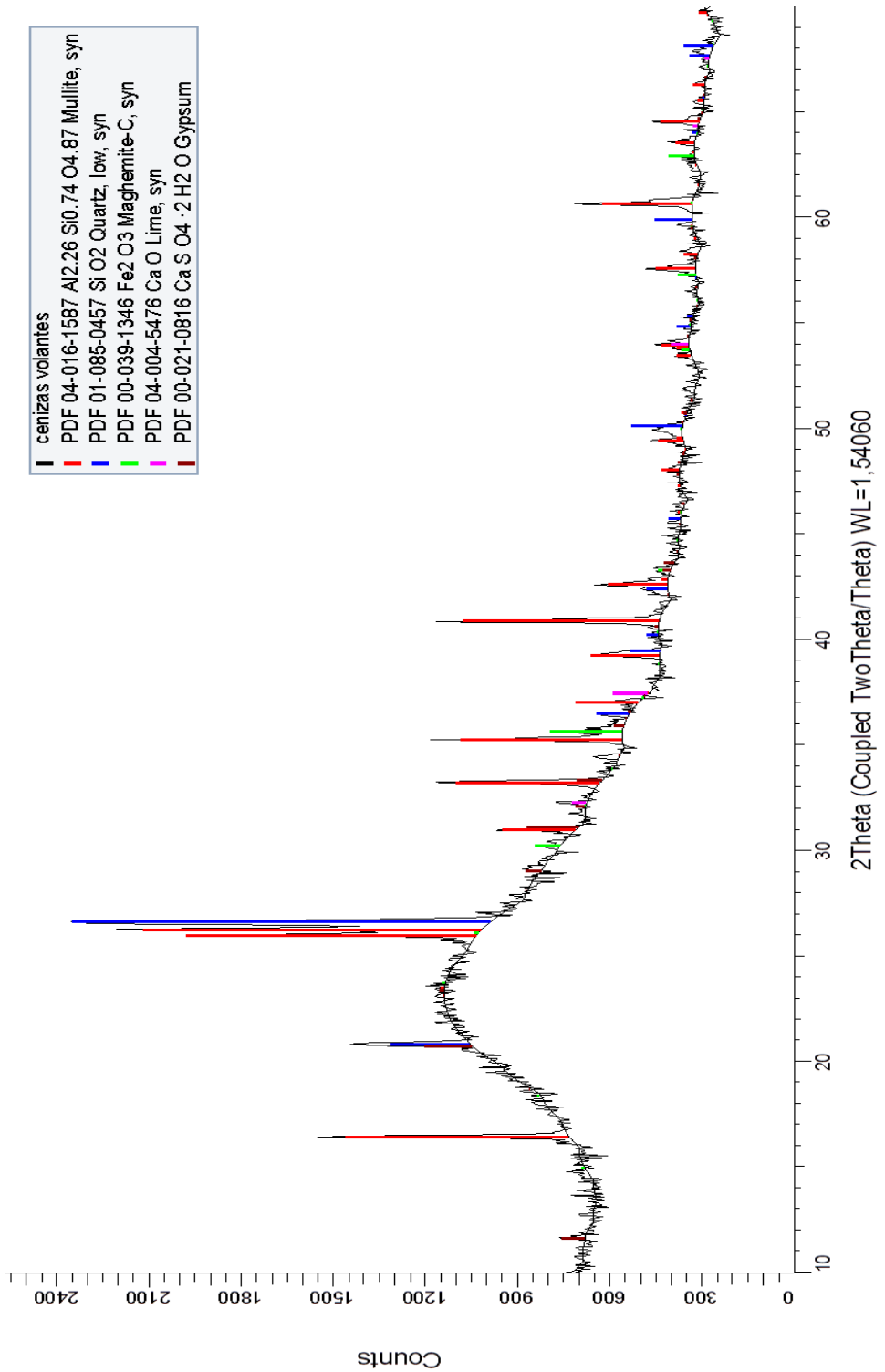


Ilustración 4.3 Difracción de rayos X de la ceniza volante

identificación de fases minerales presentes se ha realizado por medio de la base de datos del JCPDS (Joint Comité on Powder Diffraction Standards).

En el análisis de esta ceniza por difracción de Rayos X podemos ver que se trata de un material fundamentalmente amorfo, tal y como ya comentamos por la desviación observada en la línea base entre el intervalo 15-40° de 2 Theta. A pesar de que la CV está constituida fundamentalmente por fases vítreas, presenta algunas trazas de componentes cristalinos, tales como cuarzo, mullita y magnetita. Se puede observar como el componente mayoritario aparece un pico intenso de Cuarzo SiO<sub>2</sub> (marcado en color azul) acompañados de Mullita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) (marcado en color rojo).

La mullita se origina por la transformación térmica de los minerales arcillosos contenidos en el carbón. Además se pueden observar picos correspondientes a Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Lime (CaO) y yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O).

La composición química de los componentes mayoritarios correspondientes a las muestras empleadas en la investigación, se determinó mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Si tenemos en cuenta la suma de los óxidos SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las CV de Carboneras esta es de 91,32%, cumpliendo con los requisitos especificados en la norma UNE-EN 450-1:2013 y, además, se puede clasificar como de la clase F, conforme especifica la ASTM C618-12, donde la suma de los componentes SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> >70%. Por otro lado, como el contenido de CaO es muy reducido, encontrándose por debajo del 10%, estas pertenecen al grupo de silicoaluminosas (bajo contenido de cal), así lo indica Metha (1983). Con respecto al contenido en SO<sub>3</sub> y MgO estas no superan el 3% ni el 4%, como especifica UNE-EN 450-1:2013.

#### 4.2.4. Fibras

Las fibras usadas en la elaboración de las muestras para este Proyecto Final de Máster son de polivinilo de alcohol. Se ha optado por estas fibras, que aunque no responden a la premisa de tratar de realizar un hormigón con materiales de la zona, sí que son las más referenciadas en la bibliografía, incluso dando nombre a este tipo de compuesto cementicio PVA-ECC.



Ilustración 4.4 Saco de fibras de PVA empleadas

Se ha usado las fibras Kuralon REC-15 de 12 mm de la marca Kuraray procedentes de Japón.

Tabla 4.2 Propiedades de las fibras de PVA

	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Longitud (mm)</b>	<b>Resistencia a tracción (GPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>REC-15</b>	40	12	1.6	41	1.3

#### 4.2.5. Superplastificante

El superplastificante usado para la realización de estos hormigones es el BASF MasterGlenium ACE 425. Se trata de MasterGlenium ACE 425 es un aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en policarboxilatos para aplicaciones en hormigón prefabricado, donde se demande alta resistencia inicial. Su excelente poder plastificante y sus elevadas resistencias iniciales, incluso a dosificaciones bajas, hace del MasterGlenium ACE 425 el aditivo ideal para la industria del hormigón prefabricado.

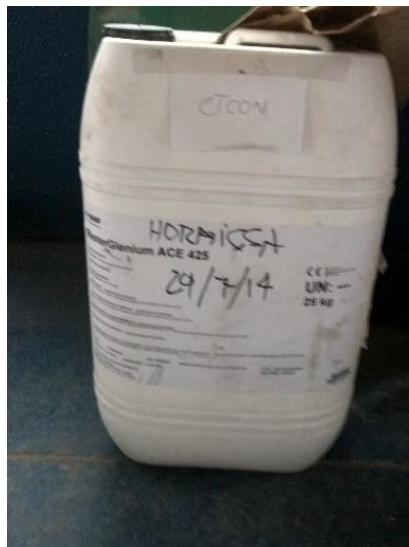


Ilustración 4.5 Superplastificante empleado

Tabla 4.3 Propiedades del superplastificante empleado

<b>Propiedades</b>	
<b>Función Principal</b>	Reducto de agua de alta actividad
<b>Efecto Secundario</b>	Riesgo de disgregación en dosis elevadas
<b>Aspecto Físico</b>	Líquido amarillo turbio
<b>pH, 20°C</b>	5.5 ± 1
<b>Densidad, 20°C</b>	1.048±0.02 g/cm <sup>3</sup>
<b>Viscosidad, 20°C</b>	< 100 cps.
<b>Contenido en cloruros</b>	

### 4.3. Dosificación

La dosificación de este tipo de hormigones se ha efectuado teniendo en cuenta la bibliografía consultada. De esta manera se recogen en las siguientes tablas los datos observados de los estudios consultados.

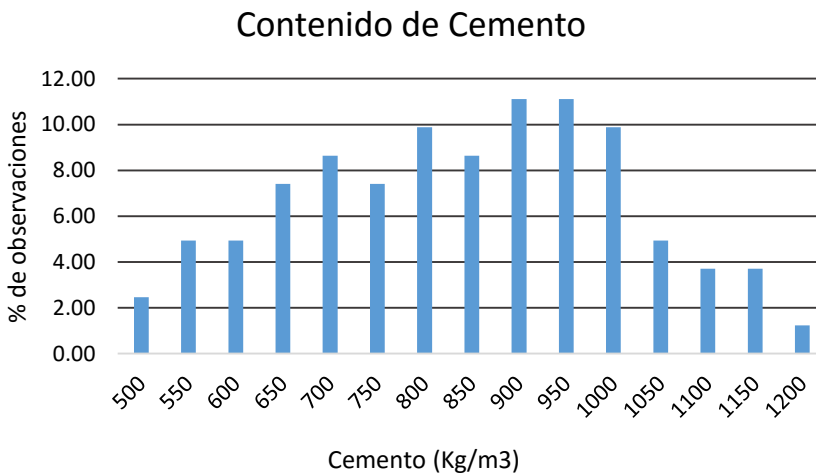


Ilustración 4.6 Observaciones realizadas sobre contenido de cemento

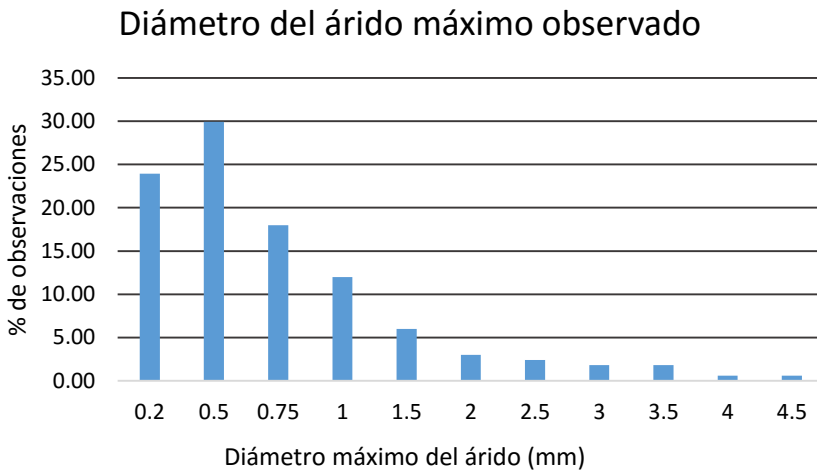


Ilustración 4.7 Observaciones realizadas sobre tamaño máximo de árido

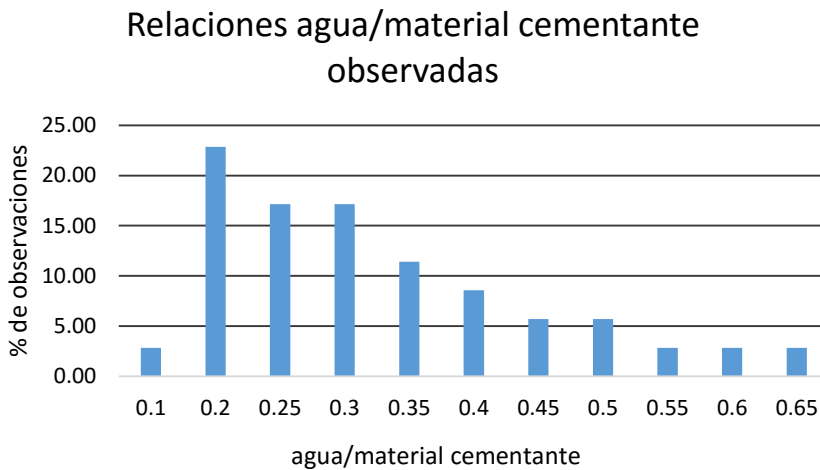


Ilustración 4.8 Observaciones realizadas sobre relación agua/material cementante

De la misma manera en el mayor número de artículos consultados el porcentaje de fibras añadido era del 2% sobre volumen de material cementante. De esta manera se ha optado por usar este porcentaje de fibras.

De esta forma se proponen dos dosificaciones para poder estudiar la ductilidad y el comportamiento multifisurativo de este tipo de hormigones. Se propone estudiar también la influencia de la adición de cenizas volantes en la respuesta dúctil y comportamiento a flexión. Para esto realizamos dos dosificaciones con diferente contenido de FA. Como se vio en el capítulo 2, la inclusión de FA en los ECC no afecta significativamente a su resistencia a compresión.

Tabla 4.4 Dosificaciones realizadas

	<b>Cemento</b>	<b>Agua</b>	<b>Cenizas Volantes</b>	<b>Arena</b>	<b>SP</b>	<b>Fibras</b>
<b>A</b>	1	0.4	1.1	0.7	1%	2%
<b>B</b>	1	0.7	2.5	1.20	1%	2%

Se elaboraron dos amasadas para cada dosificación.

#### 4.4. Proceso de mezcla

El proceso de mezcla se ha hecho siguiendo la normativa relativa a la determinación de propiedades mecánicas UNE-EN 196-1. El proceso ha sido el siguiente:

1. Cemento y cenizas volantes más la mitad del agua mezcladas con rotación lenta durante 1 minuto.
2. Incorporación del árido y mezcla a velocidad lenta durante 45 segundos y después con velocidad rápida otros 45 segundos.
3. Incorporación de las fibras y mezclado lento durante 1 minuto y rápido durante 2 minutos para conseguir una correcta dispersión y distribución de las fibras.
4. Por último se añade el agua restante y el aditivo y se mezclan durante 1 minuto a velocidad lenta y 45 segundos a velocidad rápida.

La pala de mezcla costaba con las dos velocidades establecidas en la normativa citada anteriormente las cuales se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 4.5 Velocidad de la amasadora establecidas en la UNE-EN 196-1

	Rotación ( $\text{mm}^{-1}$ )	Movimiento planetario ( $\text{mm}^{-1}$ )
<b>Velocidad lenta</b>	$140 \pm 5$	$62 \pm 5$
<b>Velocidad rápida</b>	$285 \pm 10$	$125 \pm 10$

De la misma manera la amasadora usada reunía los siguientes requisitos:

- Tener un recipiente de acero inoxidable de una capacidad aproximada de 5 l, con la forma típica y dimensiones dadas en la ilustración siguiente y equipado de manera que pueda ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, pueda ajustarse y mantenerse con precisión.

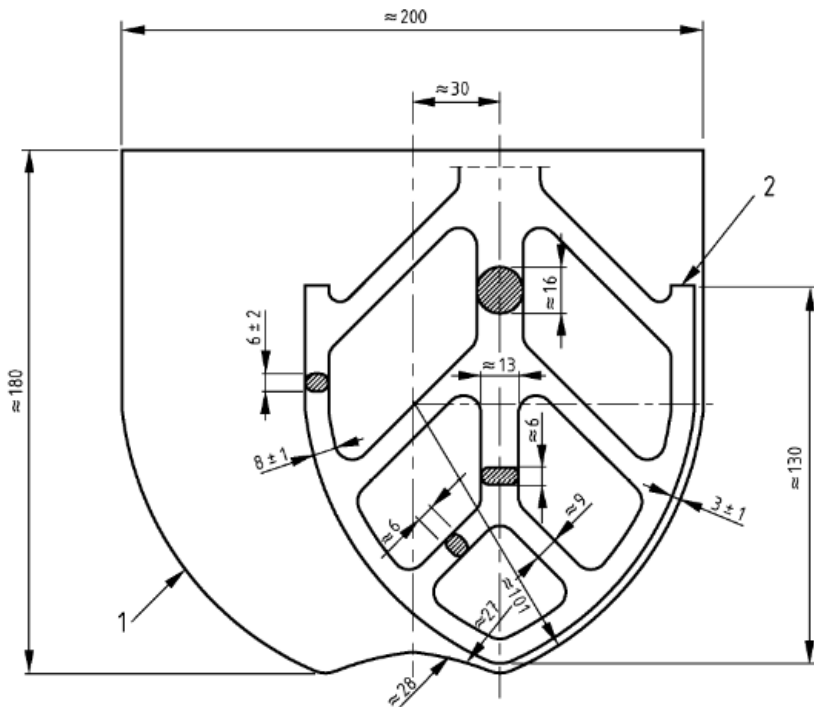


Ilustración 4.9 Recipiente y pala tipo (1- Recipiente, 2- Pala)



- Una pala de acero inoxidable, de forma típica y tolerancias como las indicadas en la ilustración 9, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas, con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente. Los dos sentidos de rotación deben ser opuestos, y la relación entre las dos velocidades no debe ser un número entero.

Palas y recipientes deben formar un juego que siempre debe utilizarse conjuntamente.



Ilustración 4.10 Amasadora usada

#### 4.4.1. Probetas

Una vez hecha la mezcla se procedió a elaborar las probetas según la norma UNE-EN 196-1. De esta manera se hicieron 2 probetas por amasada lo que hace un total 4 probetas de A y 4 de B. El tamaño de las probetas es de 40 mm x 40 mm x 160 mm.

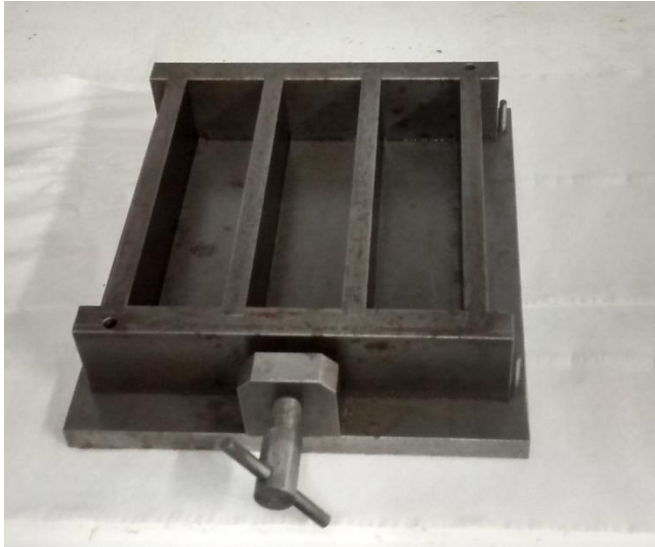


Ilustración 4.11 Moldes usados de acuerdo a la norma UNE-EN 196-1

Para el ensayo a flexión se elaboraron probetas prismáticas de 400 mm x 150 mm x 30 mm y otras de 400 mm x 150 mm x 15 mm. Se hicieron de cada tamaño 1 para cada amasada.

#### **4.5. Proceso de curado**

Las probetas se curaron durante 28 días y 90 días. Al igual que para los procesos anteriores, el proceso de curado se hizo según norma. Se curaron en agua.

Se sumergen rápidamente las probetas marcadas, de manera adecuada, colocadas horizontal o verticalmente (en este caso verticalmente) en agua a  $20.0 \pm 1.0$  °C en los depósitos adecuados.

Se colocaron las probetas sobre emparrillados y se mantuvieron separadas unas de otras, de forma que el agua tuviese libre acceso a las seis caras de las probetas. En ningún momento durante la conservación, la separación entre probetas y la lámina de agua sobre la cara superior de las mismas fue inferior a 5 mm.

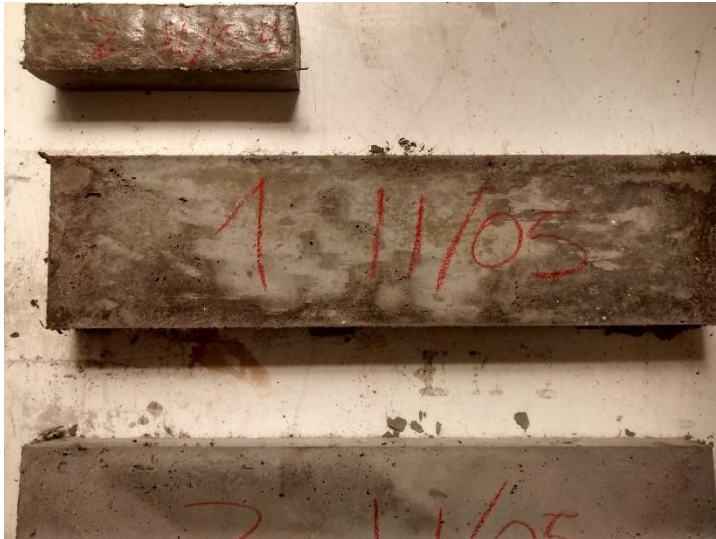


Ilustración 4.12 Probetas correctamente marcadas para su diferenciación

### 4.6. Ensayos realizados

Para determinar las resistencias mecánicas se llevaron a cabo 3 tipos de ensayos: compresión, flexión de tres puntos y flexión de cuatro puntos o flexión pura.

Tabla 4.6 Resumen de tamaño de probeta y ensayo

	<b>Ensayo a Compresión</b>	<b>Ensayo a flexión (tres puntos)</b>	<b>Ensayo a flexión (cuatro puntos)</b>
<b>Tamaño probeta</b>	40 mm x 40 mm x 160 mm	40 mm x 40 mm x 160 mm	400 mm x 150 mm x 30 mm
			400 mm x 150 mm x 15 mm

De esta manera se usó la misma máquina para los tres ensayos respetando lo fijado en la normativa para ensayos de compresión y flexión de tres puntos, para la flexión de cuatro puntos los criterios adoptados han sido sacados de los estudios y ensayos consultados.

### 4.6.1. Ensayo a flexión (tres puntos)

La resistencia a flexión puede medirse con una máquina de ensayo para resistencia a flexión o mediante un dispositivo apropiado en la máquina de ensayo a compresión. En cualquier caso, los equipos deben cumplir los siguientes requisitos:

La máquina de ensayo para la determinación de la resistencia a flexión debe ser capaz de aplicar cargas de hasta 10 kN, con una precisión de  $\pm 1.0\%$  de la carga registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, y con una velocidad de carga de  $50 \pm 10$  N/s.

La máquina debe estar provista de un dispositivo de flexión que incorpore dos rodillos de apoyo de acero de  $10.0 \pm 0.5$  mm de diámetro, distantes uno del otro  $100.0 \pm 0.5$  mm, y un tercer rodillo de carga de acero del mismo diámetro que los anteriores y equidistante de los otros dos. La longitud de estos rodillos debe estar comprendida entre 45 mm y 50 mm.

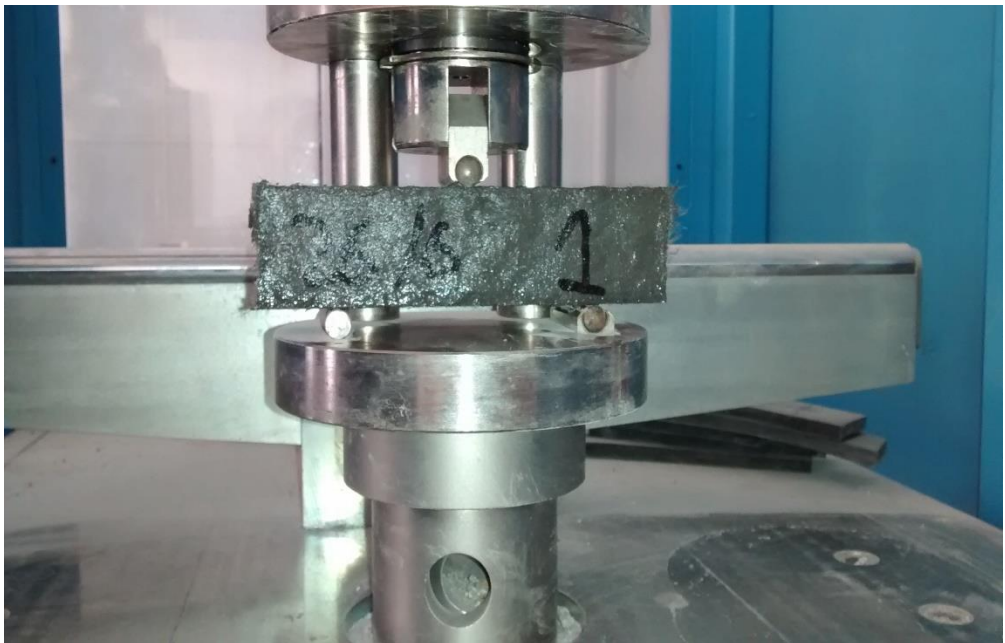


Ilustración 4.13 Inicio de ensayo a flexión

De manera esquemática la posición de la pieza y dimensiones del ensayo son las siguientes:

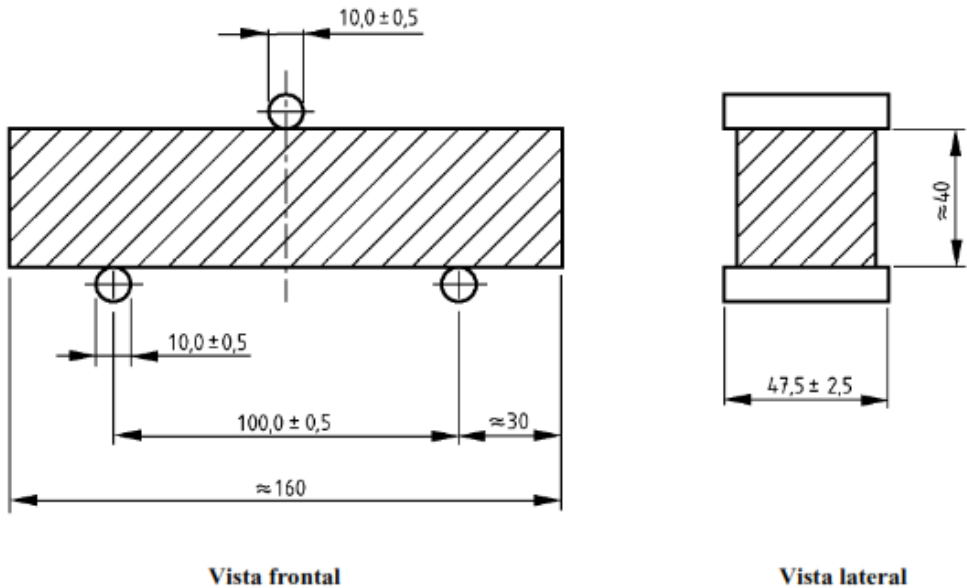


Ilustración 4.14 Dispositivo de carga para la determinación de la resistencia a flexión

#### 4.6.2. Ensayo a compresión

La máquina de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión debe tener una capacidad adecuada al ensayo: debe tener una precisión de  $\pm 1.0\%$  de la cara registrada en las 4/5 partes superiores del rango utilizado, verificado de acuerdo con la Norma EN ISO 7500-1. Debe proporcionar una velocidad de aumento de carga de  $2400 \pm 200$  N/s. Debe estar provista de un dispositivo indicador, construido de forma que el valor indicado en el momento de la rotura de la probeta permanezca indicado después de que la máquina descargue. Esto se consigue mediante un indicador de máximo en el manómetro o con una memoria en un dispositivo digital. Las máquinas de ensayo en las que la carga se regula manualmente deben estar provistas de un dispositivo de medida que controle la velocidad de carga.

El eje vertical del pistón debe coincidir con el eje vertical de la máquina y, durante la puesta en carga, la dirección del movimiento del pistón debe coincidir con el eje vertical de la máquina. Además, la resultante de las fuerzas debe pasar por el centro de la probeta. La superficie del plato inferior de la máquina debe ser perpendicular al eje de la máquina y permanecer perpendicular durante la puesta en carga.

La velocidad de carga empleada para la determinación de la resistencia a compresión desarrollada por los hormigones objeto de este proyecto ha sido de 10 kN/s.

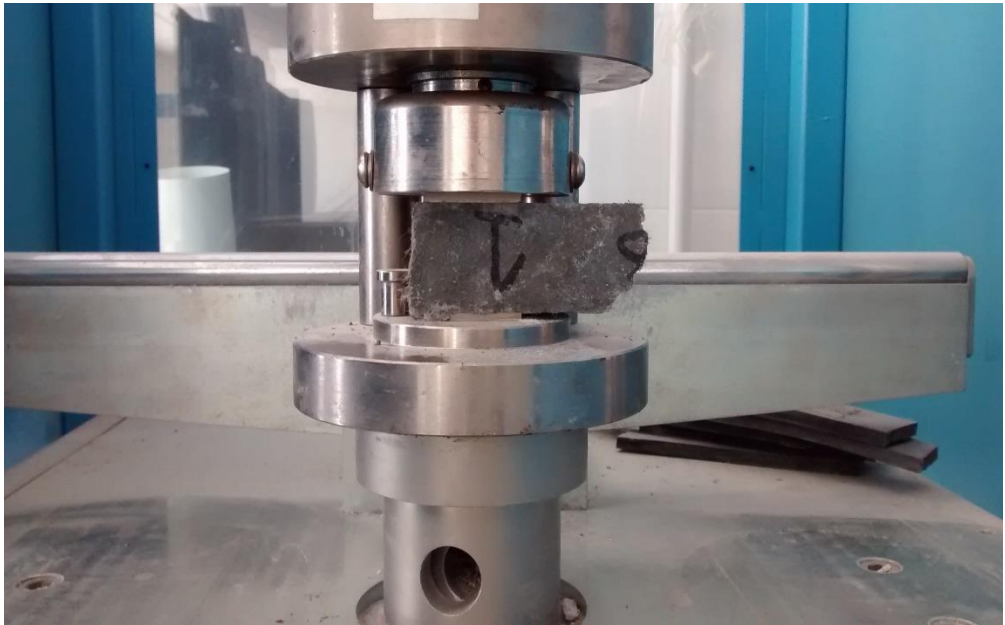


Ilustración 4.15 Dispositivo montado para el inicio del ensayo a compresión

### 4.6.3. Ensayo a flexión (cuatro puntos)

Como se ha dicho anteriormente la realización de este ensayo se ha llevado a cabo teniendo en cuenta los ensayos realizados en los estudios consultados. De esta manera las probetas sometidas a este ensayo han sido las de mayor tamaño.

La configuración del ensayo de cuatro puntos ha sido la siguiente:

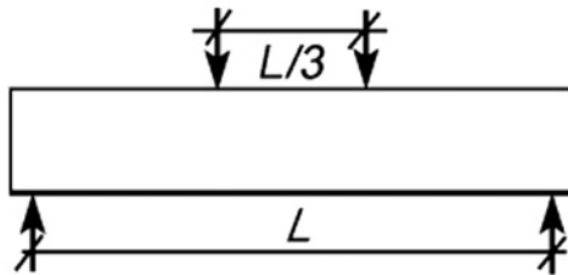


Ilustración 4.16 Configuración del ensayo de flexión a cuatro puntos

En este caso la longitud  $L$  ha sido de 300 mm y la separación entre los rodillos que aplican la carga es de 100 mm. De la misma forma la velocidad de carga aplicada ha sido de 0.1 kN/s a fin de generar el patrón de carga lo más homogéneo posible.



Ilustración 17 Dispositivo montado para el inicio del ensayo a flexión de cuatro puntos

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



## 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a detallar los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la ejecución de este proyecto. Como se dijo en el capítulo anterior los ensayos se han hecho de acuerdo a la normativa UNE-EN 196-1 en los referente a ensayos de compresión y flexión (de tres puntos); el tercer tipo de ensayo usado para determinar las características físicas y el comportamiento de las probetas, también descrito en el capítulo anterior, es el de flexión de cuatro puntos.

### 5.2. Resultados a compresión y discusión

En la siguiente tabla se recogen los datos de resistencia obtenidos en el ensayo de compresión.

Tabla 5.1 Resultados a compresión

	<b>A (Mpa)</b>	<b>B (Mpa)</b>
<b>28 días</b>	61.47 A1	65.25 B1
	63.36 A2	69.75 B2
<b>90 días</b>	99.2 A1	65.00 B1
	98.2 A2	64.10 B2

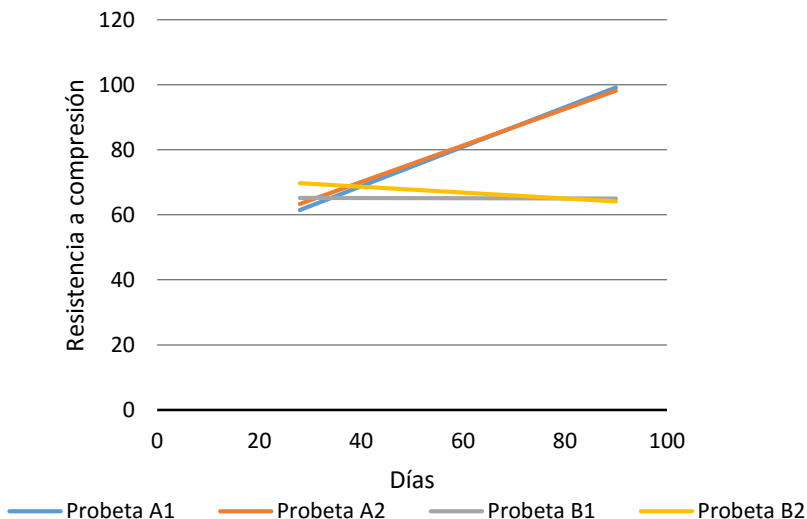


Ilustración 5.1 Evolución de las resistencias a compresión

Como se puede observar en la gráfica anterior para las probetas con mayor contenido de cemento (A1 y 2) la evolución de la resistencia es positiva siendo para A1 el aumento de un 61% y para A2 de un 64.5%. Por el contrario para las probetas con un contenido de cemento menor (sustitución de este por un mayor contenido de ceniza volante) se produce una disminución de las resistencias a compresión siendo para B1 de 1% y para B2 del 8%.

Podemos apreciar como para contenidos de cemento menores que de ceniza volante el desarrollo de las resistencias es menor, esto puede ser debido a la baja relación a/binder. De esta manera la hidratación del cemento es menor y por tanto no se desarrollan las fases resistentes producidas por los silicatos de igual manera. También puede ser atribuida a la generación de fases de ettringita inestables que con el paso de los días vuelven a cristalizar en ettringita.

De la misma manera podemos ver como para la misma dosificación hay cambios en la evolución de la resistencia. Para las tipo A las diferencias se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 5.2 Diferencias entre dosificaciones A a compresión

	<b>28 días</b>	<b>90 días</b>
<b>A1</b>	61.47	99.2
<b>A2</b>	63.36	98.2
<b>Diferencia (%)</b>	2.98	1

Como podemos observar las diferencias iniciales entre ambas probetas son mayores que las finales. Esto es debido a que a los 28 días las diferencias entre el grado de hidratación de las probetas es más acusada que a los 90 días, cuando la mayor parte del cemento ya reacciona por la hidratación.

Tabla 5.3 Diferencias entre dosificaciones B a compresión

	<b>28 días</b>	<b>90 días</b>
<b>B1</b>	65.25	65.00
<b>B2</b>	69.75	64.10
<b>Diferencia (%)</b>	6.45	1

Se aprecian las mismas diferencias que ocurren en la dosificación A, diferencias mayores a 28 días que a 90 días. Además, al igual que para la anterior, las diferencias entre las probetas disminuye a mayor edad de curado. En este caso si es mayor la diferencia de resistencias a 28 días que para A (más de un 3%), esto es debido a que la composición de las muestras A tiene un mayor contenido de cemento (20% más) que las B, por lo que

debido a la baja relación agua/material cementante es más difícil la hidratación del cemento.

De la misma manera también podemos conocer los datos “esperables” establecidos por la EHE para poder ver si las ganancias de resistencia de estos hormigones son las esperables.

Tabla 5.4 Resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo (EHE 08, tabla 30.0.4.b)

<b>Edad del hormigón, en días</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>90</b>	<b>360</b>
<b>Hormigones de endurecimiento normal</b>	0.40	0.65	1.00	1.20	1.35
<b>Hormigones de endurecimiento rápido</b>	0.55	0.75	1.00	1.15	1.20

Multiplicando los coeficientes de variación por las resistencias de las probetas a 28 días obtendríamos esos valores esperables:

Tabla 5.5 Resistencias "esperables" según EHE

	<b>28 días</b>	<b>90 días real</b>	<b>90 días esperable</b>
<b>A1</b>	61.47	99.2	73.76
<b>A2</b>	63.36	98.2	76.03
<b>B1</b>	65.25	65.00	78.3
<b>B2</b>	69.75	64.10	83.7

Se puede apreciar que los valores esperables según norma son menores para las probetas correspondientes a la dosificación A y mayores que las obtenidas para la dosificación B.

En la imagen siguiente se puede observar el patrón de rotura exhibido por las probetas sometidas al ensayo a compresión. Las fotografías A y D se corresponden con los planos incidentes del esfuerzo de compresión, mientras que B y C se corresponde con los otros planos. Se puede ver como el patrón de rotura (visible en B y C) es diferente al exhibido por hormigones tradicionales (patrón de reloj de arena), esto es debido a la presencia de las fibras. Estas fibras, debido a sus altas propiedades mecánicas, cosen la rotura que provoca por el esfuerzo a compresión cambiando la configuración del patrón de rotura. De esta manera la rotura de la probeta puede deberse a una deformación geométrica inadmisibles por la matriz cementicia.

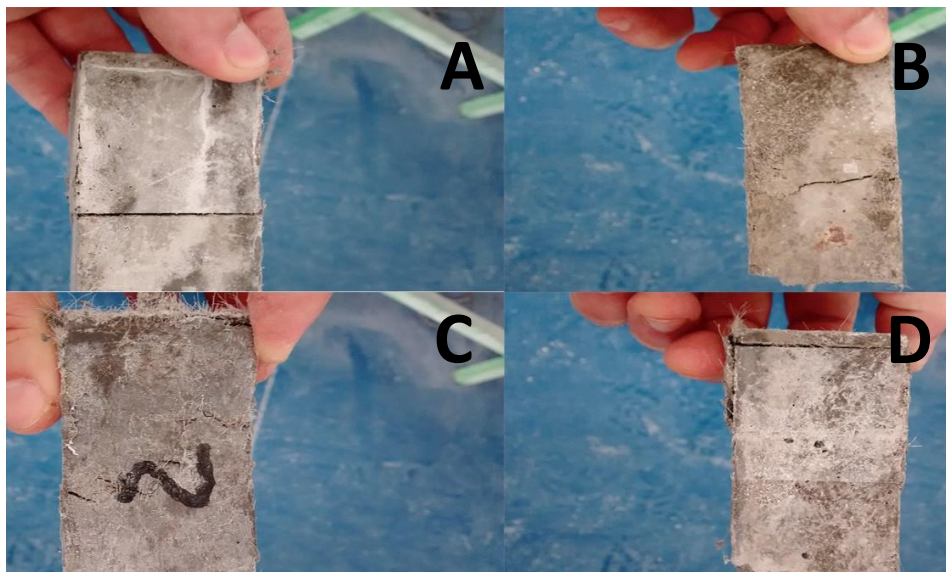


Ilustración 5.2 Probeta rota a compresión

Tabla 5.6 Resistencias a compresión de V. C. Li

<b>Valores de resistencia a compresión obtenidos por V. C. Li a 28 días (MPa)</b>									
62.74	65.55	66.71	59.74	62.01	65.73	50.65	60.34	61.83	47.58

Como se puede observar, en comparación con algunos valores obtenidos de la bibliografía consultada, las resistencias obtenidas a 28 días son ligeramente superiores a la media en el caso de las muestras A y superiores a la media en las dosificaciones B.

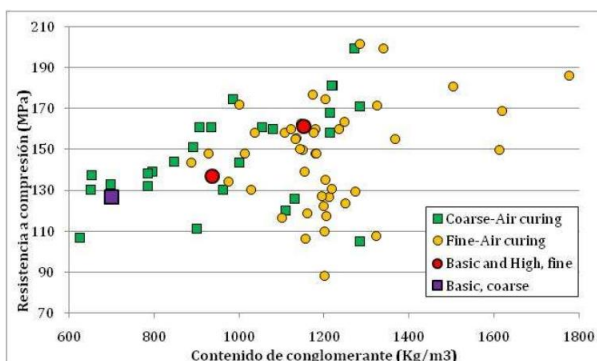


Ilustración 5.3 Datos de resistencia a compresión observados (Valencia, 2010)

En la imagen anterior están recogidos algunos datos de resistencias a compresión observadas en Valencia. En comparación con estos resultados a 90 días, los resultados obtenidos por las muestras A y B, están por debajo de estos valores.

### 5.3. Resultados a flexión y discusión

En la siguiente tabla se recogen los datos observados a flexión en las probetas de hormigón estudiadas:

Tabla 5.7 Resultados a flexión

	A (Mpa)	B (Mpa)
<b>28 días</b>	15.57	23.8
<b>90 días</b>	17.3	23.5

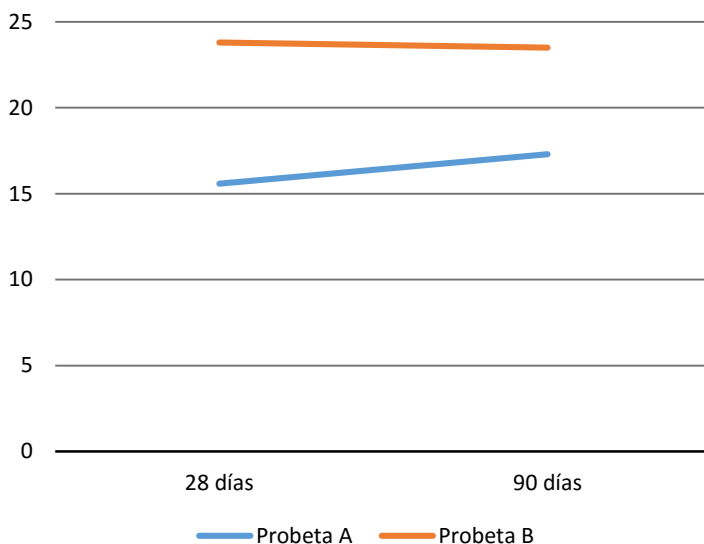


Ilustración 5.4 Evolución de resistencia a flexión

De la misma forma ocurre para los resultados a compresión, a flexión ambas muestras exhiben el mismo comportamiento. La muestra A con mayor contenido de cemento exhibe un aumento de la resistencia a flexión de un 11%. Mientras que para la muestra B, al igual que en compresión, se produce

una disminución de la resistencia, en este caso, de un 2%. En comparación con los aumentos producidos en compresión, la evolución de las resistencias a flexión, es mucho menor.

Tabla 5.8 Evolución en % de las resistencias de 28 a 90 días

	Compresión	Flexión
<b>A1</b>	61	11
<b>A2</b>	55	
<b>B1</b>	1	2
<b>B2</b>	1	

En la tabla 5.7 podemos observar como las mayores evoluciones se producen, tanto en compresión como en flexión, para las muestras A (con un mayor contenido de cemento en su dosificación), mientras que para las B (mayor contenido de cenizas volantes), se produce el mismo efecto que en compresión, que es una pequeña disminución de la resistencia.



Ilustración 5.5 Plano de rotura a flexión (Izq. muestra A, dcha. muestra B)

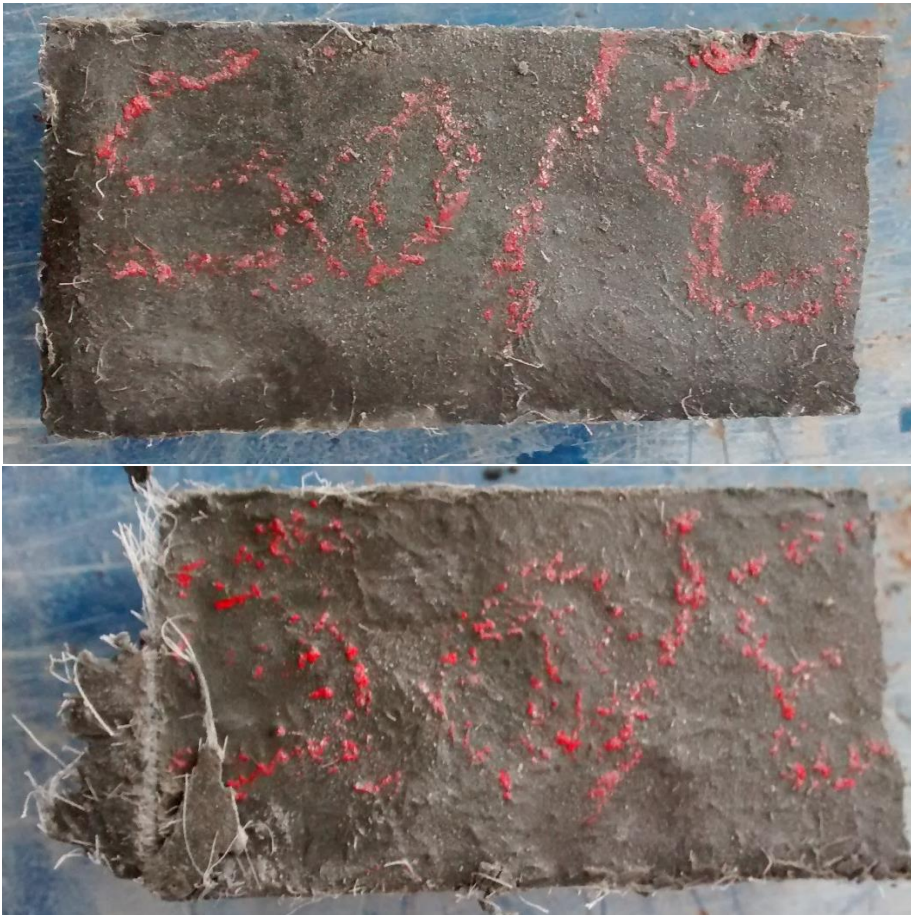


Ilustración 5.6 Perfil de rotura de probetas a flexión (arriba muestra A, abajo muestra B)

Como se puede observar en las anteriores imágenes, ambas muestras presentan perfiles de rotura diferentes. Mientras que la dosificación A tiene un perfil más regular, tanto longitudinal como transversalmente. El B por el contrario como se puede ver en la imagen 5.5 y en la 5.6 presenta un perfil más abrupto, con una menor ordenación de la matriz cementicia.

Esto contrasta con lo consultado en la bibliografía que establece que configuraciones ordenadas poseen mayores resistencias, ya que la muestra A (ordenada) posee menor resistencia a flexión que la B (aunque eso se revierte para el caso de la resistencia a compresión).



La EHE también nos provee de unos coeficientes para poder estimar la resistencia a tracción de un hormigón en función de un valor conocido, en este caso la resistencia a 28 días. De esta manera podemos conocer si la ganancia de resistencias mejor que la fijada por la EHE.

Tabla 5.9 Resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo (EHE 08, tabla 30.0.4.b)

Edad del hormigón, en días	3	7	28	90	360
<b>Hormigones de endurecimiento normal</b>	0.40	0.70	1.00	1.05	1.10

De esta forma, usando el coeficiente de 1.05 para la evolución a 90 días obtendríamos los siguientes valores:

Tabla 5.9 Resistencias esperables EHE

	28 días	90 días real	90 días esperable
<b>A</b>	15.57	17.3	16.34
<b>B</b>	23.8	23.5	24.99

Como se puede observar para la probeta A la ganancia de resistencia real es mayor que la esperable, mientras que para el caso de B, como ya ocurría para compresión la resistencia final es menor que la esperable.

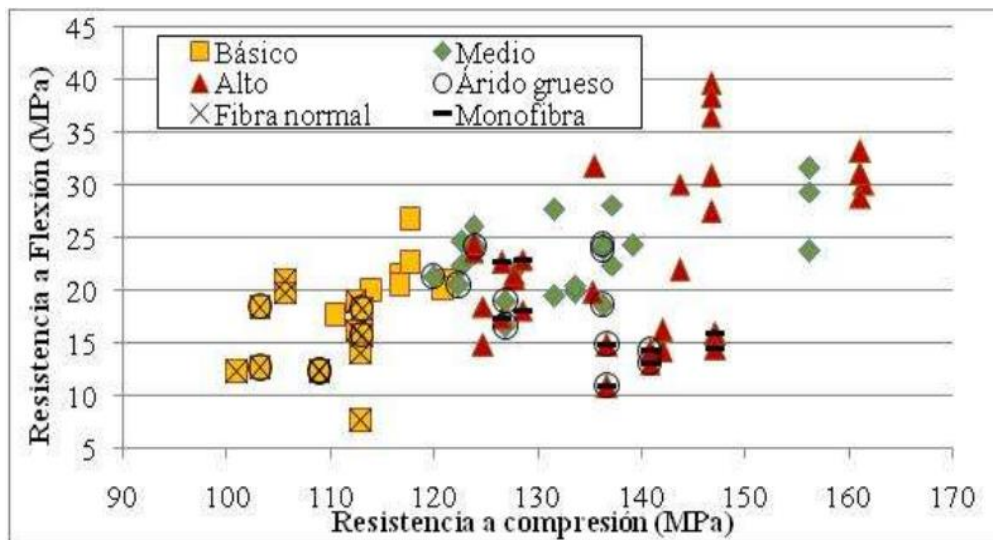


Ilustración 5.7 Datos resistencias a tracción observados (Valencia, 2010)

Cruzando los datos de compresión y flexión obtenidos en la tabla anterior de observaciones realizadas en artículos podemos observar como para el rango de resistencias a compresión obtenidas para las probetas A poseen una resistencia a compresión por encima de la media.

En el caso de la muestras B, el rango de resistencias a compresión no entraría dentro de la tabla, pero cruzando el dato de la resistencia a flexión observamos que, para esa resistencia, la resistencia a compresión de los hormigones de la bibliografía observados están en torno a los 120 MPa. Esta resistencia es el doble de mostrada por las muestras B.

#### 5.4. Comportamiento dúctil y discusión

En la siguiente tabla se encuentra los datos obtenidos del ensayo a flexión de cuatro puntos, cuyo objetivo era medir la deformación máxima en el centro de la placa antes de rotura.

Tabla 5.10 Resultados de ductilidad

		28 días		90 días	
		Esfuerzo (kn)	Deformación (mm)	Esfuerzo (kn)	Deformación (mm)
<b>Placas (15 mm)</b>	A	1.25	10.03	1.30	12.37
	B	1.30	5.04	1.42	6.03
<b>Placas (30 mm)</b>	A	2.03	2.85	2.05	2.90
	B	1.40	4.35	1.45	4.48

En los datos recogidos podemos observar que la ductilidad del material, tomada como la medida de la deformación experimentada en el centro de la pieza, aumenta de los 28 días de curado a los 90 días para todas las muestras ensayadas. Este aumento es más acusado para las placas de menor espesor, lo que, por otro lado, contradice lo mencionado en el capítulo 3, que el espesor y configuración geométrica de la pieza no tienen influencia en la deformación.

De la misma manera, cada tipo de dosificación genera una ductilidad y un esfuerzo de flexión puro resistido diferente. En este caso la dosificación A

exhibe un mejor comportamiento para el espesor de 15 mm, mientras que la dosificación B (mayor contenido en cenizas volantes) se comporta mejor para mayores espesores.

Tabla 5.11 Porcentaje de mejora de ductilidad de los 28 días a 90 días

		<b>% de mejora</b>
<b>Placa 15 mm</b>	A	23.33
	B	19.64
<b>Placa 30 mm</b>	A	1
	B	2.9

Como se puede observar la evolución de la ductilidad es más notable para menores espesores, en este caso los 15 mm. Esto es debido a que a mayor espesor la deformación que se experimenta viene condicionada por la geometría. La mayor mejora se produce en la dosificación A en espesor de 15 mm, contrastando, con que la menor se produce también para la misma dosificación A pero para el espesor de 30 mm.



Ilustración 5.8 Probeta A después del ensayo de flexión pura

En la imagen anterior podemos observar la deformación experimentada por una probeta A después del ensayo de flexión. La vara metálica colocada encima sirve para comparar la deformación obtenida.



Ilustración 5.9 Patrón de rotura

En la imagen 5.9 podemos ver cómo, gracias a la parametrización por la teoría de micromecánicas, se produce el efecto de la multifisuración. La fisura de mayor tamaño es la provocada al alcanzar la máxima capacidad de carga con la consiguiente rotura. Se pueden observar múltiples microfisuras que confluyen en la de mayor tamaño.

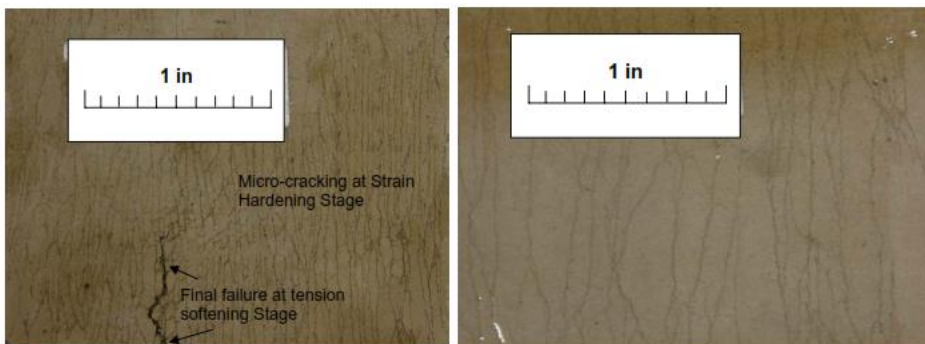


Ilustración 5.10 Patrones de multifisuración (Li, 2006)

En comparación con el estado multifisural conseguido por Li (2006), el desarrollado por las muestras A y B es mucho menor. De igual modo, el patrón de rotura es el mismo, una fisura de mayor tamaño a la cual confluyen una gran cantidad de estas microfisuras.

## 5.5. Conclusiones y trabajos futuros

A modo de lista se recogen las principales conclusiones extraídas durante la elaboración de este proyecto final de máster:

- La aplicación práctica de los hormigones ultra dúctiles (ECC) queda restringida a un mayor desarrollo tecnológico. La necesidad de unos parámetros de control y un estudio pormenorizado hace difícil su dosificación y empleo en obra.
- El contenido moderado de fibra (un 2% en volumen) hace de este hormigón dúctil adaptable a condiciones de obra donde se requieran elementos prefabricados.
- El contenido moderado de fibra cumple con uno de los parámetros exigidos a los hormigones de ultra altas prestaciones que la asequibilidad.
- La alta capacidad de deformación crea sinergia con el comportamiento dúctil de los refuerzos metálicos.
- La ganancia de ductilidad no está reñida con la consecución de resistencia a compresión elevada, cumpliendo con los parámetros exigibles a los UHPC.
- El comportamiento dúctil de estos hormigones y sus altas resistencias los hacen idóneos para su implantación en zonas sísmicas, aumentando de manera notable la seguridad y durabilidad de las estructuras.
- La teoría de fractura y microfisuración así como el campo de intercambio energético empleado para el estudio de las fisuras abre un campo totalmente novedoso para su estudio y empleo en materiales de base cementicia.

De esta manera durante la redacción de este proyecto también surgen las siguientes vías de estudio para emplear en trabajos futuros:

- El estudio de las propiedades autoregenerativas de estos hormigones motivado por la rehidratación de granos de cemento sin hidratar debido a la baja relación a/c.
- El empleo de la teoría de microfisuración para desarrollar modelos predictivos basados en ensayos reales sobre probetas de hormigón para conocer el comportamiento interno durante la rotura.
- Mediante el empleo de microacústica modelar en 3D el proceso de rotura de la matriz cementicia a modo de tener una maqueta en la poder ver el desarrollo de las microfisuras a nivel interno.
- Extender y estudiar la parametrización basada en la teoría de microfisuración en hormigones reforzados con fibras de diferentes tipos.

## 6. Bibliografía

---

ACI Committee 212 (2001), "Admixtures for Concrete (ACI 212.3R-91)", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Detroit, MI

American Society for Testing and Materials (U.S. Code Organization)

American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-02) and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute. FarmingtonHills, MI. 2002



Baraguru, P. D., and Bhatt, D., "Rapid Hardening Concrete", Report No. FHWA NJ 2001-3, New Jersey Department of Transportation, Trenton, New Jersey, 22 pages, 2000

Federal Highway Administration (FHWA), Manual of Practice: Materials and Procedures for Rapid Repair of Partial-Depth Spalls in Concrete Pavements, Federal Highway Administration (FHWA), 135 pages, 1999

Fischer, G., and Li, V. C., "Effect Of Matrix Ductility On Deformation Behavior Of Steel Reinforced ECC Flexural Members Under Reversed Cyclic Loading Conditions", ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 6, pp. 781-790, 2002.

Kanda, T. and V.C. Li, "Effect of Apparent Fiber Strength and Fiber-Matrix Interface on Crack Bridging in Cement Composites," ASCE J. of Engineering Mechanics, Vol. 125, No. 3, pp. 290-299, 1999.

Kanda, T., and Li, V. C., "Interface Property and Apparent Strength of a High Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix", ASCE J. Materials in Civil Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 5-13, 1998

Leung, C. K. Y., and Li, V. C. (1990). "Strength-based and fracture based approaches in the analysis of fibre debonding." J. Mat. Sci. Letter, 9, 1140–1142.

Li, V. C., "Engineered Cementitious Composites (ECC) – Tailored Composites Through Micromechanical Modeling", Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future, Eds: N. Banthia, A. Bentur, and A. Mufti, Canadian Society of Civil Engineers, pp. 64-97, 1990

Li, V. C., "High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair", Int'l J. for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 10, No 2, 163–180, 2004

Li, V. C., and Fischer, G., "Reinforced ECC - An Evolution from Materials to Structures", Proceedings of the First FIB Congress, Osaka, Japan, pp.105-122, Oct. 2002.

Li, V. C., "Performance Driven Design of Fiber Reinforced Cementitious Composites", in Proceeding of 4th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, Ed. R. N. Swamy, pp. 12-30, Chapman and Hall, 1992

Li, V. C., and Leung, C. K. Y., "Theory of Steady State and Multiple Cracking of Random Discontinuous Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.118, No.11, pp. 2246-2264, 1992

Li, V. C., Lepech, M. and Li, M., "Final Report on Field Demonstration of Durable Link Slab for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites," submitted to Michigan Department of Transportation, 2005

Li, V. C., and Stang, H. (1997). "Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites." J. Advanced Cement Based Mat., 6(1), 1–20.

Li, V. C., and Wu, H. C., "Conditions for Pseudo Strain Hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites", Journal of Applied Mechanics Review, Vol.45, No.8, pp. 390-398, 1992

Li, V. C., "High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair," Int'l J. for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 10, No 2, pp 163–180, 2004

Lin, Z., Kanda, T., Li, V. C., "On Interface Property Characterization and Performance of Fiber-reinforced Cementitious Composites", Journal of Concrete Science and Engineering, RILEM, No.1, pp. 173-184, 1999

Lin, Z., and Li, V. C. (1997). "Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces." J. Mech. Phys. Solids, 45(5), 763–787.

Lim, Y. M. and Li, V. C., "Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites," J. Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 4, pp. 373-385, 1997.

Michigan Department of Transportation (MDOT) (2003), "Qualification Procedure For Prepackaged Hydraulic Fast-Set Materials for Patching Structural Concrete", MDOT Quality Assurance and Quality Control (QA/QC)

Wang, K., Jansen, D. C. and Shah, S. P., "Permeability Study of Cracked Concrete", *Cement and Concrete Research*, 27, 3, pp. 381-393, 1997

Wang, S. and Li, V. C., "Tailoring of Pre-existing Flaws in ECC Matrix for Saturated Strain Hardening," *Proceedings of FRAMCOS-5*, Vail, Colorado, U S A, April 2004, pp. 1005-1012, 2004

Weimann, M. B. and Li, V. C., "Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC)", *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 9, No 5, pp513-534, 2003

Zhang, J., *Fatigue fracture of fiber reinforced concrete—an experimental and theoretical study*. PhD thesis, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, Serie R, 41, 1998.

Zhang, J., Stang, H., Li, V. C., *Fatigue life prediction of fibre reinforced concrete under flexure load*, *Int. J. Fatigue* 21 (10), 1999

Zhang J., Li, V.C., "Monotonic and Fatigue Performance in Bending of Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite in Overlay System ," *J. of Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No.3, pp. 415-423, 2002