

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO Y CON FIBRA DE POLIOLEFINA



Autor

ROSTRA RODRÍGUEZ, SERGIO

Tutor

VERCHER SANCHIS, JOSE M^a

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA
2020-2021

I. RESUMEN.

El objetivo principal de este trabajo es observar cómo influye la incorporación de fibras, en ausencia de barras de acero, en la mejora de la resistencia a compresión y a flexión del hormigón reforzado.

En este trabajo se ha realizado un estudio comparativo de los hormigones reforzados con fibra de vidrio tipo AR (GRC) y con fibra de poliolefina. La campaña de la fibra de poliolefina consiste en 3 lotes de 2 probetas por dosificación analizada y la de fibra de vidrio consiste en 1 lote de 3 probetas para cada dosificación. En ambos casos las probetas están ensayadas a flexión y a compresión por métodos destructivos.

En las fibras de vidrio se aprecia un creciente valor de la resistencia a flexión, mientras que en las fibras de poliolefina se aprecia una pequeña subida a compresión con las dosificaciones más altas, manteniendo valores prácticamente constantes en las otras proporciones.

Usando fibras de poliolefina se aprecia un efecto que no se produce con las fibras de vidrio, en parte por su diferencia de longitud. Pensadas para evitar la fisuración por retracción en pavimentos y revestimientos, se consigue una elevada adhesión con la pasta de cemento, viéndose claramente cómo ayuda a mantener la fisura cerrada. De esta forma, controlando la fisuración, se puede hablar de un efecto beneficioso en base a la sostenibilidad.

Además, se han realizado pruebas incluso con proporciones de fibra mayores que las recomendadas por los fabricantes, de cara a extraer unas conclusiones más completas.

PALABRAS CLAVE:

Fibra estructural; fibra de vidrio; fibra de poliolefina; fibra de polialqueno; resistencia a los álcalis; flexión; compresión; dosificaciones; adhesión; fisuración; HRFV; GRC; TPO.

I. SUMMARY.

The main objective of this work is to observe how the incorporation of fibers, for lack of steel bars, influences the improvement of the compressive and flexural strength of reinforced concrete.

In this work, a comparative study has been carried out of concrete reinforced with fiberglass type AR (GRC) and with polyolefin fiber. The polyolefin fiber campaign consists of 3 batches of 2 specimens per dosage analysed and the fiberglass campaign consists of 1 batch of 3 specimens for each dosage. In both cases, the specimens are tested for bending and compression by destructive methods.

In glass fibers an increasing value of flexural strength is observed, while in polyolefin fibers a small rise in compression strength is observed with the highest dosages, maintaining almost constant values in the other proportions.

It can be seen an effect using polyolefin fibers that is not produced with glass fibers, partly because of their difference in length. Designed to avoid shrinkage cracking in pavements and coatings, a high adhesion is achieved with the cement paste, clearly showing how it helps to keep the fissure closed. In this way, controlling the cracking, one can talk about a beneficial effect based on sustainability.

In addition, tests have even been carried out with fiber ratios higher than those recommended by the manufacturers, in order to draw more complete conclusions.

KEYWORDS:

Structural fiber; fiberglass; polyolefin fiber; polyalkene fiber; alkali resistance; bending; compression; dosages; adherence; cracking; HRFV; GRC; TPO.

I. RESUM.

L'objectiu principal d'aquest treball és observar com influeix la incorporació de fibres, en absència de barres d'acer, en la millora de la resistència a compressió i a flexió del formigó reforçat.

En aquest treball s'ha realitzat un estudi comparatiu dels formigons reforçats amb fibra de vidre tipus AR (GRC) i amb fibra de poliolefina. La campanya de la fibra de poliolefina consisteix en 3 lots de 2 provetes per dosatge analitzat i la de fibra de vidre consisteix en 1 lot de 3 provetes per a cada dosatge. En tots dos casos les provetes estan assajades a flexió i a compressió per mètodes destructius.

En les fibres de vidre s'aprecia un creixent valor de la resistència a flexió, mentre que en les fibres de poliolefina s'aprecia una xicoteta pujada a compressió amb les dosificacions més altes, mantenint valors pràcticament constants en les altres proporcions.

Usant fibres de poliolefina s'aprecia un efecte que no es produeix amb les fibres de vidre, en part degut a la diferència de longitud. Pensades per a evitar la fisuració per retracció en paviments i revestiments, s'aconsegueix una elevada adhesió amb la pasta de ciment, veient-se clarament com ajuda a mantenir la fissura tancada. D'aquesta manera, controlant la fisuració, es pot parlar d'un efecte beneficiós basant-se en la sostenibilitat.

A més, s'han realitzat proves fins i tot amb proporcions de fibra majors que les recomanades pels fabricants, de cara a extraure unes conclusions més completes.

PARAULES CLAU:

Fibra estructural; fibra de vidre; fibra de poliolefina; fibra de polialquè; resistència als àlcalis; flexió; compressió; dosatges; adhesió; fisuració; HRFV; GRC; TPO.

INDICE:

CAPITULO 0. OBJETIVOS.	6
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.	7
CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE.	8
2.1. Antecedentes internacionales a nivel de investigación	8
2.2. El hormigón reforzado con fibras	10
2.3. Hormigón reforzado con fibras de vidrio (HRFV)	12
2.3.1. Fabricación de las fibras de vidrio	13
2.3.2. Tipos de fibras de vidrio	15
2.3.3. La fibra de vidrio AR	17
2.4. Hormigón reforzado con fibras de poliolefina (HRFP)	18
2.4.1. Fabricación de las fibras de poliolefina	19
2.4.2. Tipos de fibras sintéticas	20
2.4.3. La fibra de polipropileno	21
2.5. Investigaciones actuales con fibras sintéticas	23
CAPITULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.	24
3.1. Programa general	24
3.2. Plan de trabajo	25
3.2.1. Materiales	26
3.2.1.1. Áridos	26
3.2.1.2. Agua	27
3.2.1.3. Cemento	27
3.2.1.4. Aditivo	27
3.2.1.5. Fibras de vidrio AR	28
3.2.1.6. Fibras de poliolefina	29
3.2.2. Identificación de las probetas	30
CAPITULO 4. PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO.	32
4.1. Diseño de la mezcla de hormigón	32
4.2. Amasado	33
4.3. Ensayos mecánicos	42
4.3.1. Ensayo de rotura por flexión simple	43
4.3.2. Ensayo de resistencia a compresión	48
CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS.	51
5.1. Resultados de los ensayos.	51
5.2. Análisis de los ensayos.	56
CAPITULO 6. CONCLUSIÓN.	63
CAPITULO 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	66
CAPITULO 8. BIBLIOGRAFÍA.	67
CAPITULO 9. AGRADECIMIENTOS.	69
II. ANEXOS	70
ANEXO 1. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).	71
ANEXO 2. INDICE DE TABLAS.	73
ANEXO 3. INDICE DE IMAGENES.	74

CAPITULO 0. OBJETIVOS.

Desde el estudio de los hormigones como material de construcción siempre me ha llamado la atención la **posibilidad de sustituir parcial o totalmente la armadura por otros materiales**, consiguiendo prestaciones similares u otras más interesantes. Es por ello por lo que he querido orientar este trabajo al análisis y estudio de los hormigones reforzados.

En la antigüedad ya se usaban morteros reforzados con fibras naturales como cuero, piel, lana, seda, lino, etc. A lo largo de la historia se han ido experimentando con diferentes tipos de fibras naturales, pero no fue hasta mitad del siglo XX cuando se empezaron a fabricar productos sintéticos. Estos materiales son más nuevos y se conoce muy poco del **potencial** que pueden tener **en la construcción**.

Este trabajo se basa en las **fibras artificiales**. Inicialmente se busca una mejora de las propiedades mecánicas de los hormigones usando la **fibra de vidrio comparando diferente tamaño**. Pero hay un inconveniente, en el mercado actual **no se comercializan fibras de vidrio largas**. Ante este problema, una solución que se plantea es cortar hilos de una longitud determinada a partir de una malla de fibra de vidrio, pero debido a la complejidad que supone se determina optar por otro material sintético.

Se conoció la **fibra de poliolefina** gracias a la empresa MAPEI, vendida como un material nuevo que aporta propiedades interesantes a las matrices cementicias. Esta fibra se comercializa en **formato largo de 65mm**, por lo que se adopta para este trabajo y se compara con la fibra de vidrio de 12mm.

Como trabajo de investigación se propone utilizar una **dosificación de fibras más alta de lo recomendado** por el fabricante. Se aplica a la fibra de poliolefina al apreciarse una mejora mecánica y un efecto interesante de cosido tras la fisuración.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

El hormigón hoy en día es uno de los materiales más usados para la construcción en ingeniería civil (puentes, presas, túneles, etc.) y en edificación (hospitales, viviendas, escuelas, etc.). Es capaz de soportar esfuerzos de compresión fácilmente, pero a tracción tiene muy poca resistencia por lo que es necesario disponer una armadura para garantizar su integridad.

En la realización de losas y soleras el hormigón se arma con mallazos, armaduras que mejoran la compactación y reducen la fisuración por retracción. La tecnología permite el uso de otros materiales para solventar estos problemas.

Las fibras tienen numerosas aplicaciones en la construcción. Se usan desde la antigüedad mezclándose con barro para hacer adobe. No fue hasta la Revolución Industrial cuando se empezaron a sintetizar. Actualmente existen muchos tipos de fibras: de cáñamo, de acero, sintéticas, de vidrio, de metales amorfos, etc.

En este trabajo se utilizan fibras de vidrio y fibras sintéticas de poliolefina. Se realizan varias dosificaciones llegando a sobrepasar las cantidades recomendadas por fabricantes. El objetivo de este trabajo es comparar el hormigón tradicional con los reforzados para analizar la influencia de la fibra en las dosificaciones planteadas.

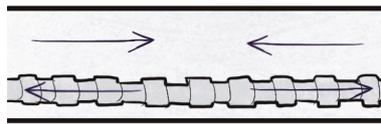


Imagen 1. Esquema de absorción de esfuerzos en el hormigón armado. Armadura trabajando a tracción mientras que el hormigón absorbe compresiones.

Según la norma **UNE EN 83516:2015** se define **FIBRA** como:

“Producto resultante de cortar filamentos o hilos de base para utilizarlos como refuerzo de pastas, morteros y hormigones”

Dadas por su composición específica del óxido de circonio, esta norma considera apropiadas las fibras de vidrio resistente a los álcalis (AR) para mezclar con hormigones.

La norma **UNE EN 14889-2:2008** define **POLÍMERO** como:

“Material polimérico basado en poliolefina, por ejemplo, polipropileno o polietileno, poliéster, nailon, acetato de polivinilo (PVA), poliacrílico, aramidas y combinaciones de éstos”

La fibra empleada para este trabajo de investigación es la fibra de polipropileno, resistente a los ambientes alcalinos consiguiendo durabilidad en el tiempo.

Ambas **fibras** son **artificiales**. El enfoque sostenible de este trabajo se fundamenta en las propiedades de las fibras para coser la fisuración de los hormigones. Todo este efecto se analiza en el capítulo 6 con detenimiento. En el anexo 1 figuran las implicaciones de este estudio con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**.

CAPITULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES A NIVEL DE INVESTIGACIÓN.

Del mismo modo que el siglo XIX queda caracterizado por el hierro y el acero, el siglo XX y el siglo XXI son conocidos por la época de los productos sintéticos (plásticos, fibras artificiales, cauchos sintéticos, compuestos, adhesivos, etc.) A diferencia de los productos naturales que se encuentran en la naturaleza, los sintéticos se consiguen a partir de éstos sometiendo a procesos químicos e industriales.^[14]

Los dos grandes grupos de plásticos son los **termoplásticos** y los **termoestables**. Los termoplásticos pueden ser moldeados en caliente y en frío mientras que los termoestables solo pueden ser moldeados en caliente, manteniendo su forma.

Los polímeros termoplásticos se caracterizan por estar formados por largas cadenas de hidrocarburos, derivados del petróleo.^[13] Estos son:

Polietileno (PE)
Policloruro de vinilo (PVC)
Polipropileno (PP)
Poliestireno (PS)
Acetato PVA
Polímeros acrílicos
Polibutileno (PB)

Estos materiales se usan para fabricar utensilios que usamos cada día como los bolígrafos, jarras, el teléfono, etc.

El uso de estos materiales se remonta a la **Segunda Guerra Mundial**, cuando se utilizaron para construir sistemas de telecomunicaciones, radares e incluso aviones. A principios de siglo XX apenas se conocía nada de estos productos sintéticos, en ese momento solo había modificaciones de los polímeros naturales.

En **1862** A. Parkes desarrolla la **celulosa nitrada**, usada en fotografía, como aislante eléctrico y para moldeados, pero no sirvió para su propósito. Su modificación posterior por J. W. Hyatt en acetato de celulosa⁽¹⁾ se usa para barnizar y revestir aviones de guerra, y su capacidad de moldeado por inyección permite su fabricación en forma de fibra.

En **1907** se descubre la **baquelita** al mezclar el acetato de celulosa y la galatita, generando resinas. Es usada para fabricar palas de rotores, cabezas de distribuidor, etc.

En **1930** aparece el **poliestireno**, plástico duro y transparente, mejorado más tarde en Estados Unidos. Un año más tarde se descubre el poliácido metílico, mejorado en polimetilmetacrilato (PMMA), usado en la Segunda Guerra Mundial para fabricar los parabrisas de los aviones dada su dureza y ligereza.

En **1933** es sintetizado el **cloruro de polivinilo** en los laboratorios ICI de Gran Bretaña, termoplástico pensado como una alternativa para aislar eléctricamente, aunque el etileno polimerizado (polietileno) era más efectivo.

Alrededor de **1950** se descubre en Italia que el **polipropileno** se puede polimerizar mediante catalizadores, se usa en la fabricación de molduras y en la producción de fibras ya que resultaba bastante económica.^{[14][18]}

(1) El acetato de celulosa o celuloide es el primer termoestable basado en fenol-formaldehído, considerado como mero pringue. Junto con la galatita son los primeros plásticos usados en el siglo XX.^[13]

El polímero más usado en la fabricación de fibras es el PFRV (poliéster reforzado de fibra de vidrio). El interés de este material en la industria de la construcción comienza en la década de los 60, llegando a representar el 6,6% de su uso en este sector. Se lleva usando desde el antiguo Egipto para reforzar vasos y ánforas, pero no es hasta el siglo XVIII, en Francia, donde se empieza a manufacturar este tipo de fibras, compuestas por las materias primas del vidrio (sílice, cal, alúmina y magnesita) Las fibras sintéticas tienen especial interés en este sector para reforzar suelos, ya que cuentan con una geometría óptima para adherirse con su matriz.^[16]

Con la industrialización de las fibras de vidrio se incorporan aditivos para conseguir diferentes prestaciones dando como resultado una gran variedad de **tipos de fibras de vidrio**, explicadas en la página 16:^[18]

A	AR	B	C	D	E	ERC	PFRV R	S	X
----------	-----------	----------	----------	----------	----------	------------	---------------	----------	----------

Cada uno de ellos está destinado a un uso específico, la fibra de vidrio AR se utiliza en este trabajo. Se trata de una fibra artificial con gran resistencia a la tracción, ideal para reforzar las matrices de cemento en construcciones de obra nueva o de restauración. Estos materiales, al ser ligeros y con altas propiedades mecánicas suponen una ventaja en la facilidad de transporte y de montaje en obra, y resultan económicos.^[18]

Debido a sus propiedades autolimpiable, resistente al fuego y aislante térmico, se usan mucho en el tema de seguridad sustituyendo al amianto en tabiques antifuego, tubos, comunicaciones, etc. Es diez veces más resistente que el polipropileno. Se usa mucho en paneles arquitectónicos, placas de recubrimiento, muros anti-ruido, canalizaciones de agua, pórticos y barandillas.^[18]

2.2. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS.

El hormigón es el material más empleado en la construcción, es muy resistente a compresión, pero tiene escasa resistencia a tracción y flexión, por lo que se suele combinar con otros materiales para mejorar sus prestaciones. Tradicionalmente se han usado barras corrugadas de acero. A medida que la tecnología y la investigación avanza han tenido una relevancia especial las fibras para mejorar la matriz cementante, ofreciendo un refuerzo práctico y económico.

La norma **EHE-08** establece **admisible la adición de fibras en hormigones en masa, pretensado y armado**. En su Anejo 14 “los hormigones reforzados con fibras (HRF) se definen como aquellos que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa”.^[5]

Estando recogido en la norma vigente, se ha investigado en este tipo de hormigones a lo largo de la historia. Las primeras fibras de refuerzo fueron las naturales, como pelo animal, de sisal, de cáñamo, de celulosa, etc. El crecimiento de la tecnología y de la industria ha permitido poner a prueba el hormigón con nuevos materiales sintéticos.

El hormigón reforzado con fibras soporta generalmente esfuerzos de tracción mayores debido a la adherencia de las fibras al hormigón, controlando la fisuración y mejorando la tenacidad.^[7]

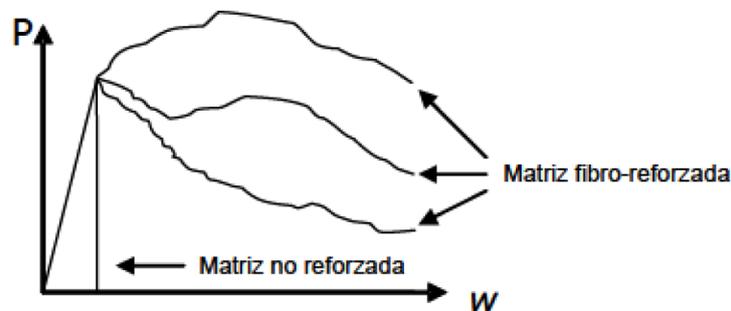


Imagen 2. Curva de tensión-deformación en el ensayo a flexión.^[7]

Usando estas fibras se consigue una mayor durabilidad del hormigón. Esto permite sustituir las mallas electrosoldadas en losas y pavimentos, reduciendo a su vez la mano de obra. Al adicionar altas proporciones de fibras es necesario añadir un aditivo superplastificante para simplificar el amasado y evitar la reducción de docilidad.^[8]

Las fibras se **dosifican** en **kilogramo de fibra por cada metro cúbico de hormigón (kg/m³h)** o en función del **volumen** que ocupan **respecto a la masa de hormigón (%/m³h)**. Suelen ser similares según la densidad de la fibra.^[8]

Los experimentos de 1964 por el Dr. Biryukovick en matrices cementantes aluminosos dieron a conocer el efecto del **ataque alcalino** a la gran mayoría de fibras. Más tarde se experimentó con fibras de vidrio recubiertas por capas de circonio, presentando una gran cualidad ante el ataque de los álcalis del cemento. Esta investigación se realizó entre Building Research Establishment⁽²⁾ y la fábrica de vidrio Pilkington Brothers Limited.⁽³⁾

Los primeros hormigones reforzados con fibras sintéticas se hicieron con asbesto (asbetocementos) debido a que aumentaba la trabajabilidad del hormigón y resulta económico, pero actualmente está prohibido porque provoca enfermedades mortales. La búsqueda de refuerzo en la matriz del hormigón llevó a usar fibras de origen orgánico (aramidas, nailon, polipropileno...), inorgánico (vidrio, boro, carbono) y metálicos (hierro, fundición, acero, níquel, titanio, aluminio) La que **mejor relación precio/propiedades mecánicas presenta es la fibra de vidrio.**

(2) (3) La fibra de vidrio que contiene circonio fue descubierta por el BRE en 1967, patente otorgada a Pilkington Brother Ltd., denominada CemFIL, usadas principalmente para elaborar paneles de fachada prefabricados de G.R.C.^[10]

2.3. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE VIDRIO (HRFV).

A finales del siglo XX se buscó una alternativa para reforzar los hormigones debido a la escasez del acero. Las investigaciones a lo largo de siglo permitieron la fabricación de fibras de materiales poliméricos o sintéticos, pero no todas aportan las mismas propiedades al hormigón.

Las fibras sintéticas tienen numerosas ventajas frente a otro tipo de fibras, como las metálicas:

[8]

- Peso ligero
- Alta resistencia y rigidez
- Baja conductividad
- Excelente resistencia a la corrosión y alta durabilidad;

Algunos inconvenientes:[8]

- Módulo elástico menor que las fibras metálicas.
- Sensibilidad a la luz solar y a altas temperaturas. Se debe guardar en un lugar protegido del sol directo.
- Menor adherencia a la matriz.
- Esfuerzos de tracciones en la dirección normal a la principal tiende a debilitar la fibra.

Los primeros ensayos que se realizaron fueron con fibras de vidrio tipo E, fibras con buenas propiedades dieléctricas, pero resultaban destruidas para la acción abrasiva de los álcalis del cemento. Posteriormente se usaron fibras con alto contenido en circonio, las ya mencionadas fibras de vidrio álcali-resistente (AR).

Los hormigones reforzados con fibras de vidrio son conocidos en el mercado como **GRC (Glass Reinforced Concrete)**, matriz de cemento Portland reforzada con fibra de vidrio tipo AR. Las fibras de vidrio se usan normalmente para elementos no estructurales o semiestructurales, presentando numerosas **aplicaciones**, entre otras:

- Elaboración de prefabricados como los paneles sándwich arquitectónicos.
- Encofrados permanentes o perdidos.
- Placas para recubrir fachadas. (Estado Santiago Bernabeu, edificio Adriática de la Plaza de Emilio Castelar de Madrid, etc.)

2.3.1. FABRICACION DE LA FIBRA DE VIDRIO.^{[7] [16]}

La fibra de vidrio está compuesta por hebras a base de sílice extruidas para conseguir filamentos finos aptos para tejer. La técnica de calentado e hilado se conoce desde hace mucho tiempo, pero no fue hasta mediados del siglo XX cuando el avance tecnológico permitió elaborar las fibras de vidrio estandarizadas.

Actualmente existen dos métodos de fabricación de la fibra: por fundición directa y por refundición de canicas. Ambas parten del material en forma sólida para posteriormente fundirlo alcanzando temperaturas de 1550°C y separarlo obteniendo la mezcla vitrificable.

- **MÉTODO DE FUNDICIÓN DIRECTA:** la mezcla vitrificable pasa directamente por unos insertos o hileras, se hace pasar por una placa de aleación de platino y rodio caliente con boquillas para conformar la fibra.

- **FUNDICIÓN INDIRECTA O REFUNDICIÓN DE CANICAS:** las canicas se refunden en contenedores para posteriormente extruirlo mediante espirales roscadas, conformando lo que conocemos como fibra. La placa de insertos en este proceso actúa como distribuidor de calor ayudando a fundir la fibra.

PROCESO DE PRODUCCIÓN POR FUNDICIÓN DIRECTA

- 1º Para conseguir filamentos continuos se **atempera** y se le agrega **apresto**, una preparación especial para pueda enrollarse. A la salida de los insertos se somete a gran velocidad para conseguir el diámetro deseado. Tras conseguir el vidrio fibrado se enfría rápidamente en diferentes fases, por radiación y por pulverización de agua fría, evitando la orientación de sus partículas consiguiendo su estado amorfo.
- 2º Para poder usar estos filamentos es necesario revestirlos de una fina película con una dispersión acuosa llamada **ensimaje**, esta mezcla será distinta en función de las propiedades que se busquen en la fibra, dando lugar a diferentes tipos comentados en el siguiente apartado.
- 3º Posteriormente se trata de la **unión** de los filamentos mediante peinas para conseguir los formatos comerciales (bobinado, hilos cortados, mallas, etc.), controlando la velocidad de rotación y estirado.
- 4º El proceso más común para unir estos filamentos es la **acción centrífuga por rotación**, consiguiendo la conocida fibra más corriente, la lana de vidrio. Separa el vidrio en trozos horizontales mientras que un flujo de aire lo empuja hacia abajo, recibiendo el aglutinante, y pasando posteriormente por un horno de curado.

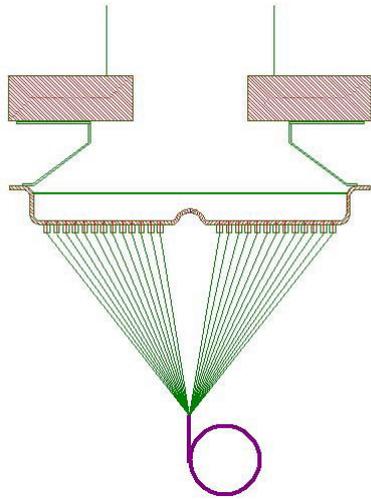


Imagen 3. Método de fundición directa.^[16]

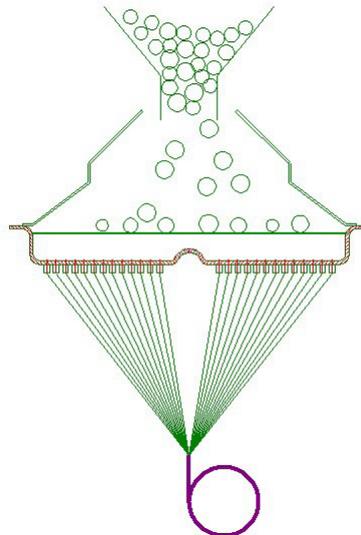


Imagen 4. Método de fundición indirecta.^[16]

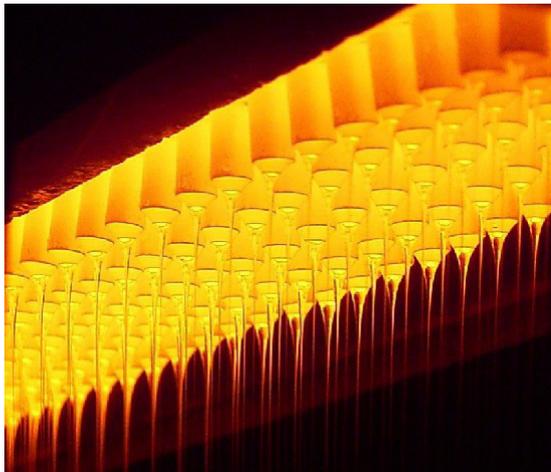


Imagen 5. Salida del vidrio fundido.^[16]

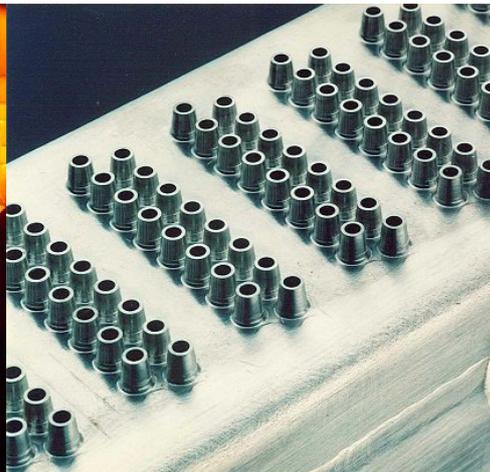


Imagen 6. Boquillas de salida.^[16]



Imagen 7. Aletas de enfriamiento.^[16]

2.3.2. TIPOS DE FIBRAS DE VIDRIO.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SU FORMA^[22]

ROVING ENSAMBLADO O MECHAS. Son bobinas u ovillos formando rollos de hilos de fibra. Se distinguen dos tipos, mechas duras, de ensimaje compatible con las resinas de impregnación, y mechas blandas, en la que los hilos mojados se separan con rapidez.

HILOS CORTADOS. Los hilos del ovillo son cortados en determinadas longitudes. Se usan en preparación de “premix” para la fabricación de amasados, colado-vibrado o proyecciones de pastas. Se distinguen los hilos cortados íntegros, capaces de aguantar grandes abrasiones durante el amasado, y los hilos cortados dispersables en agua, se dividen en filamentos individuales al contacto con una disolución acuosa.

MAT O FILAMENTOS CONTÍNUOS. Hilos cortados aglomerados entre sí con un ligante químico formando una especie de fieltro de gramaje bajo (100-225gr/cm²), facilitando la dosificación y orientación de las fibras. Se encuentran en rollos de 1-1,5m de ancho, ofreciendo la misma resistencia en todas las direcciones.

MALLA. Tejido fabricado a partir de roving con diferente trama y luz de malla. Se distinguen mallas unidireccionales, con más hilos en un sentido que en otro, y mallas bidireccionales, mimos número de hilos y disposición en ambas direcciones.

FIBRA MOLIDA. Se trata de hilos de vidrio molidos proporcionando la fibra a granel, compatible con resinas específicas para uso en varios compuestos termoplásticos.

VELOS DE SUPERFICIE. Telas finas de fibra de vidrio de superficie lisa y uniforme usados como capa superficial suavizando piezas conformadas.

El formato de fibra cortada es la utilizada en este trabajo de investigación.



Imagen 8. Tipos de fibra de vidrio según su forma.^[22]

TIPOLOGÍA^{[2][12][18]}

VIDRIO AR: resistente a álcali.

Vidrio álcali-resistente, es el único que puede combinarse debido a su característica resistente a los álcalis del cemento, gracias a su alto contenido en óxido de zirconio. Se utiliza este tipo de vidrio en el trabajo.

VIDRIO C: vidrio químico.

Vidrio álcali-cal con buena resistencia a la corrosión. Compuesto por óxido de boro.

VIDRIO A: álcali-cal.

A diferencia del vidrio tipo C, el vidrio A carece de óxido de boro.

VIDRIO D: de alto desempeño dieléctrico.

Vidrio con buenas propiedades eléctricas al ser un material dieléctrico. Compuesto por borosilicato.

VIDRIO E: dieléctrico.

Vidrio más comúnmente usado por sus características dieléctricas. Compuesto con aluminoborosilicato con menos de un 1% en peso de óxidos alcalinos.

VIDRIO ECR: eléctrico y resistente químico.

Vidrio con alta resistencia a los medios ácidos. Compuesto con silicato álcali-cal con menos de 1% en peso de óxidos alcalinos.

VIDRIO R: de alto desempeño mecánico.

Vidrio usado por sus características resistentes a la fatiga, a la temperatura y humedad. Compuesto con aluminosilicatos.

VIDRIO S: de alta resistencia.

Vidrio de gran resistencia mecánica. Compuesto con aluminosilicatos con alto contenido de óxido de magnesio.

2.3.3. LA FIBRA DE VIDRIO AR.

La fibra con mejor relación precio-propiedades mecánicas capaz de reforzar el hormigón es la fibra de vidrio. Gracias a las investigaciones del Building Research Establishment en 1967 se demuestra la resistencia de estas fibras ante la alcalinidad de los cementos Portland debido a su alto contenido en óxido de circonio. Se continuaron las investigaciones y fue patentado este producto como **AR-Glassfibre** o **fibra de vidrio AR (álcali-resistente)**. Aporta elasticidad al hormigón consiguiendo mejores comportamientos antes de la ruptura y una mayor durabilidad.^[24]

Es un filamento de vidrio con suficiente flexibilidad para ser usado como fibra. Está recubierto con un apresto que la protege y mejora su adherencia con la resina epoxídica de poliéster. Su diámetro más usado es de 10 picómetros, más finos incluso que el pelo humano.^[24]

La fibra de vidrio AR se conoce comercialmente como **CemFIL**. Se desarrolló en **dos generaciones: CemFIL-1 y CemFIL-2**. La composición química de ambas generaciones se distingue en la siguiente tabla:^[20]

COMPOSICION	CEMFIL-1	CEMFIL-2
SiO	59,40%	60,60%
FeO	0,00%	0,00%
TiO	0,10%	0,10%
AlO	0,70%	0,70%
CaO	5,10%	4,70%
MgO	0,00%	0,00%
NaO	14,90%	14,20%
KO	0,30%	0,30%
LiO	0,00%	0,00%
BO	0,00%	0,00%
ZrO	18,00%	14,10%

Tabla 1. Composición química de las fibras de primera y segunda generación.^[20]

1ª GENERACIÓN DE FIBRAS AR- CemFIL 1 (Majumdar).^[25]

Esta generación contiene un 16% aproximadamente de óxido de circonio, muy superior al de las fibras E. Pero su uso se quedó limitado debido a un problema evidente de envejecimiento, reduciendo su tenacidad y resistencia al impacto.

2ª GENERACIÓN DE FIBRAS AR - CemFIL2.^[25]

Sigue teniendo algunos inconvenientes pero presenta mejores resultados que la primera generación. Está tratada superficialmente con un inhibidor, como cenizas volantes, puzolanas o humo de sílice, que se libera paulatinamente en la matriz cementicia del hormigón, reduciendo la velocidad de la reacción álcali/vidrio.

Actualmente se usa Metakaolin para revestir estas fibras, consiguiendo una mejor duración de la fibra con el tiempo. Se trata de una puzolana sintética obtenida por calentamiento en aire de la caolinita.

La segunda generación es la que se utiliza para sus **aplicaciones** en la industria de la construcción:^{[22][24]}

- Sustitución de asbesto en tejados y coberturas.
- Paneles de revestimiento en fachada (GRC).
- Pavimentos y revestimiento de túneles.
- Puertas y pantallas anti fuego.
- Piscinas.

2.4. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIOLEFINA (HRFP).

En 1956 se empieza a fabricar el polipropileno a partir de investigaciones previas con las olefinas. Tiene numerosas propiedades pero debido a la sensibilidad al frío y a la luz ultravioleta, se dejó de usar hasta 1970. A partir de ese momento su usaba principalmente en la fabricación de automóviles y electrodomésticos.^[18]

El uso de fibras sintéticas para reforzar hormigones se dio en la década de los 90 debido a la escasez del acero. Hay muchos polímeros que se pueden usar para reforzar la matriz de la mezcla cementante: polietileno, polipropileno, nylon, poliéster, kevlar, etc.^[8]

Las fibras que se usan en esta investigación son a base de poliolefina. Son polímeros dispuestos en cristales de cadena recta ordenadas una al lado de otra, unidas fuertemente por puentes de hidrógeno. Debido a las **ventajas**^[4] que tiene el uso de estas fibras en los hormigones, la industria ha ido desarrollando formas cada vez más innovadoras para reforzar los hormigones.

- Estabilidad química ante cloruros y álcalis.
- Naturalmente antiestáticas.
- Muy resistentes al manchado.
- Fácil orientación en el hormigón. Facilita la distribución de tensiones en la masa de forma homogénea.
- Aumenta la tenacidad frente a la fractura.
- Aumenta la resistencia a impacto.
- Mejora la resistencia residual a flexotracción para aberturas de fisuras hasta 2,5mm.

Algunos **inconvenientes**:^[4]

- No mantiene su forma tras repetidas deformaciones.
- La temperatura de transición vítrea es inferior a la temperatura ambiente (-5°C a -15°C)
- A temperaturas superiores a la del ambiente se reducen sus propiedades mecánicas.
- Tiende a adoptar una nueva forma con el movimiento molecular en el polímero.

Debido a su uso reciente en la construcción tiene **aplicaciones**^{[6][8]} en muchos campos:

- Elaboración de alfombras, tapicerías, filtros, etc.
- Prendas de vestir.
- Aislamiento eléctrico.
- Soleras.
- Piscinas.
- Paneles de fachada.
- Recubrimientos.
- Hormigón prefabricado.
- Hormigón proyectado.
- Losas de hormigón.
- Sostenimiento de túneles.
- Sustitución parcial o total de las armaduras pasivas en elementos estructurales sometidos a tracción.

Su regulación está estipulado en las normas UNE **83500-2** y UNE **14889-2**.

2.4.1. FABRICACIÓN DE LAS FIBRAS DE POLIOLEFINA.^[17]

Las fibras plásticas son elementos rectos o deformados de material extruido, orientado y cortado, apropiado para ser adicionados a una mezcla. Existen diferentes métodos de fabricación de estas fibras, pero parten de una misma materia prima: polímero formador.

- 1º TRANSFORMADO.** Se transforman los polímeros formadores en fluido con ayuda de un tornillo extrusor aportando calor (termoplásticos) o con una disolución (termoestables). Para conseguir polímeros especiales se disuelve en una mezcla reactiva.
- 2º HILADO.** En esta fase el fluido o mezcla se extruye a través de unas hileras llamadas "spinneret". El líquido se hace pasar por diferentes estados mientras se va hilando hasta solidificar.

Para realizar el hilado se conocen cinco métodos diferentes:

HILADO EN HÚMEDO

Es el método más antiguo. La mezcla se extruye directamente en una mezcla química o líquido de precipitación. Con este método se obtienen las fibras acrílicas, rayón, aramida, modacrílicas y spandex.

HILADO EN SECO

La mezcla se extruye y se le hace pasar por una cámara de gas inerte para conseguir la solidificación. Se consiguen las fibras de acetato, triacetato, acrílico, modacrílicas, polibenzimidazol, spandex y policloruro de vinilo.

HILADO POR FUSIÓN

Previamente a la extrusión, se funden las fibras para posteriormente solidificar por enfriamiento. Se consiguen fibras de nylon, basadas en olefinas, poliéster, Saran (copolímero de cloruro de vinilideno y cloruro de vinilo) y sulfar (polisulfuro de fenileno). Por este método se pueden conseguir diferentes texturas y formas en la sección de la fibra: redondas, trilobulares, pentagonales, octogonales, etc.

HILADO EN GEL O EN SECO-HÚMEDA.

La mezcla en forma de cristal-líquido se extruye en el spinneret pasando posteriormente por aire y por un baño líquido para su enfriamiento. Con este proceso se obtienen fibras de alta resistencia, ya que se consigue un alto grado de orientación.

HILADO POR ESTIRAMIENTO Y ORIENTACIÓN

Las fibras pasan por un proceso de calentamiento, estirado y enfriamiento a través de diferentes rodillos. De esta forma las moléculas se juntan y se corrige la orientación a lo largo de su eje, confiriéndole mayor resistencia.

2.4.2. TIPOS DE FIBRAS SINTÉTICAS.^{[1][9]}

Las fibras sintéticas se pueden clasificar de varias formas, según su forma física, comportamiento, sección, materiales, entre muchas otras.

FORMA FÍSICA

Clase Ia: Micro-fibras <0,30mm diámetro; mono-filamentosas

Clase Ib: Micro-fibras <0,30mm diámetro; fibrilosas

Clase II: Macro-fibras >0,30mm diámetro
(cuando se requiere aumentar la resistencia residual a flexión)

Se usan las fibras de clase II en esta investigación.

COMPORTAMIENTO

(Rossi et al., 1987)

Macro-fibras: mejora del comportamiento tras las macro-fisuras. (>20mm de largo).

Micro-fibras: controlan el crecimiento de las micro-fisuras. (≤20mm de largo).

SECCIÓN

Fibras con sección transversal **circular**

Fibras con sección transversal **elíptica**

Fibras **rectangulares**

Fibras con sección transversal **irregular**

2.4.3. LA FIBRA DE POLIPROPILENO.

El polipropileno es una de las poliolefinas más importantes actualmente. El polipropileno fue descubierto por **Giulio Natta** en **1954**. Se obtiene a partir de la alineación ordeada del monómero propileno mediante la polimerización catalítica de metaloceno. Sus propiedades físicas se ven alteradas al fundirse y posteriormente enfriarse, esto se conoce como historial térmico.^[23]

Es un polímero **termoplástico** y **semicristalino**. Su fase amorfa le proporciona capacidades mecánicas ante impacto y alargamiento haciendolo capaz de absorber energía. Su fase cristalina le aporta capacidad mecánica ante tracciones, dureza, tenacidad y módulo.^[23]

Presenta una estructura helicoidal lo que lo hace un **material muy poco denso, alrededor de 0,905g/cm³**. En función de dónde esté situado el grupo metilo en su estructura se diferencian **ordenaciones moleculares del polipropileno**:^[23]

ISOTÁCTICO.

Es la estructura más común. Las moléculas se ordenan formando líneas paralelas.

ATÁCTICO.

Menos del 10% de las moléculas quedan ordenadas, siendo la forma mayoritaria en zig-zag. Este tipo de estructura se usa en adhesivos, rellenos de cables o modificaciones de betún.

SINDIOTÁCTICO.

Resulta ser la forma inversa del atáctico, formando igualmente estructura en zig-zag.

En ausencia de grupos funcionales de etileno, se pueden diferenciar **tres tipos de estas poliolefinas**:^[23]

HOMOPOLIMEROS.

Polipropileno.

Presentan buena rigidez y propiedades ópticas.

COPOLIMEROS BLOQUE O HETEROFÁSICOS.

Polipropileno o polietileno.

Se añade un bloque de etileno al final de la cadena, en un 8-14%.
Son muy opacos, resistentes al impacto, pero con buena rigidez.

COPOLIMEROS RANDOM.

Polipropileno o etileno.

Se añade un bloque de etileno en el primer reacto en menos de un 5%.
Son más brillante y transparentes que los copolimeros bloque. Tienen menor rigidez pero mantienen la resistencia al impacto.

IF (g/10min)	Contenido en etileno	Impacto IZOD (KJ/m2)	M.E.F. (Mpa)
Homopolímeros			
1,5	-	6,9	1250
9	-	3,1	1500
35	-	2,8	1650
Copolímeros heterofásicos (bloque)			
1,5	9%	35	1100
9,5	12%	37,5	1100
13	6%	8,1	1300
35	9%		1300
Copolímeros random			
9	3,50%	6,9	950
20	3,50%	6,3	1000

Tabla 2. Índices de fluidez del polipropileno^[23]
M.E.F.: Módulo elástico en flexión

Según el índice de fluidez (IF) y la distribución de pesos moleculares (DPM) indicados en la tabla 2 se podrán conseguir diferentes productos (fibra, filamento, plancha, cast film o inyección):^[23]

- DPM: estrecha; IF:1-5g/10min **Mono-multifilamento**
- DPM: estrecha, IF: 12-25g/10min **Fibras cortadas o por inyección.**

En función de su módulo elástico en flexión (M.E.F.) se puede clasificar como **flexible** o **rígido**, siendo un parámetro fundamental para conocer su deformación. Un polímero rígido ofrece una resistencia a la rotura ante una fuerza instantánea elevada. Está estrechamente ligado con la dureza, oposición a ser rayado o penetrado. La resistencia al impacto en frío es baja, excepto para el polipropileno heterofásico.^[23]

El formato **macro-fibra** aporta unas **propiedades** interesantes a los hormigones:^{[6][21]}

- Aislamiento térmico.
- Alta resistencia a la tracción.
- Aumenta la tenacidad de fractura del hormigón.
- Baja absorción de agua.
- Baja absorción de humedad, lo que dificulta la adherencia con la matriz del hormigón.
- Capacidad de absorción de energía mejorando la resistencia residual a flexotracción.
- Distribución homogénea de tensiones en 3 dimensiones debido a su orientación uniforme en la matriz.
- Estabilidad química frente a oxidación y degradación.
- Incrementan la resistencia a impacto.
- Mejora el comportamiento a fuego. Su punto de fusión alcanza los 175°C.
- Reduce el desgaste en equipos de bombeo.
- Reduce la microfisuración por retracción plástica en pavimentos y soleras.
- Reduce los fenómenos de "spalling".
- Resistencia a la abrasión.
- Su superficie rugosa le ayuda a adherirse al hormigón.

Su resistencia a tracción, rigidez y dureza son mayores que otros polímeros como el polietileno (PE), aunque a impacto es menor.^[21]

2.5. INVESTIGACIONES ACTUALES CON FIBRAS SINTÉTICAS.^[25]

A pesar de ser un material con buen comportamiento, su baja resistencia a tracción ha limitado su uso en la construcción. A lo largo de los años se ha investigado la isotropía de la fibra de polipropileno a tracción probando con diferentes materiales.

En los años 60 del siglo XX se hicieron los primeros estudios del polipropileno en Estados Unidos. Se conocía por ser el más apropiado para reforzar los hormigones debido a su resistencia a los ácidos minerales, básicos y sales orgánicas. Se empezó a usar como sustituto de la malla electrosoldada.

En la década del 70 se desarrolló en Gran Bretaña la primera generación de fibra AR, resistente a los álcalis del cemento. No fue hasta diez años después cuando se desarrollaron las fibras AR de segunda generación, con un recubrimiento especial para evitar su degradación con los ácidos.

En ese momento se usaban para los pavimentos industriales, puertos, túneles y prefabricados, como los conocidos paneles de GRC, conformados por ese entonces con fibra de vidrio permitiendo reducir su espesor.

En 2008 adquirió **especial interés** el uso de esta fibra, siendo regulada por un anexo de la instrucción española del hormigón armado, **EHE-08**. Su uso para aligerar la cantidad de acero en las estructuras supuso un punto de inflexión en la historia del hormigón, usándose cada vez más para reforzar soleras y pavimentos en ambas caras. En hormigones estructurales, las fibras permiten usar armaduras pasivas soportando la energía ante la rotura, mejorando la durabilidad.

Hoy en día las fibras que más se emplean para reforzar los hormigones son las fibras metálicas, pero pueden utilizarse otras poliméricas o de vidrio.

Los estudios más recientes que se han realizado sobre las fibras poliméricas siguen buscando la justificación de su comportamiento en la matriz del hormigón en condiciones especiales, investigación sobre las causas y efectos de la adhesión de las fibras en el mismo, implicación en varios fenómenos de rotura (efecto "spalling"), su durabilidad, etc.

Muchas empresas están investigando hoy en día con nuevas dosificaciones, tipos de fibras y aditivos para conseguir mejores prestaciones en los hormigones.

CAPITULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

3.1. PROGRAMA GENERAL.

El programa general de esta investigación se basa en la comparación de fibras de vidrio y de poliolefinas en hormigones reforzados. Estos hormigones se usan para estructuras que requieran grandes resistencias, como losas, prefabricados o pretensados, por lo que se confecciona un hormigón de resistencia media.

Para cuantificar el efecto de las fibras AR y de poliolefinas en el hormigón se realizarán ensayos comparativos entre “hormigón patrón” (sin fibras) y hormigones con distinta cantidad de fibra.

Los ensayos que se realizan son de resistencia a compresión y a flexión a la edad de 28 días.

Para realizar esta investigación se establece un plan de trabajo especificando materiales, probetas y dosificaciones usados.



Imagen 9. Probeta de muestra del hormigón reforzado con fibra de poliolefina.

3.2. PLAN DE TRABAJO.

La investigación, de tipo experimental, se realiza en el laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universitat Politècnica de València. Lo primero de todo es adquirir los materiales necesarios para la elaboración de las mezclas:

Aditivo.
Agua.
Arena.
Cemento Portland.
Fibra de polipropileno.
Fibra de vidrio.
Grava.

Conocidos los materiales se plantean las dosificaciones para la investigación. Se decide tomar un hormigón patrón con una densidad aproximada de $240\text{kg}/\text{cm}^3$. Las fibras de vidrio y de polipropileno se dosifican en diferentes porcentajes en la mezcla. Los hormigones se definen como:

Diseño del hormigón patrón 1 y 2.
Diseño del hormigón con fibra de vidrio.
Diseño del hormigón con fibra de polipropileno.

Para la elaboración de cada masa se hace uso de la maquinaria disponible en laboratorio y se usan los moldes especificados según norma UNE para este tipo de hormigones:

Probetas prismáticas 10x10x40cm para la fibra de vidrio.
Probetas prismáticas 15x15x60cm para la fibra de polipropileno.

Posteriormente es necesario llevar las probetas a la cámara de curado durante 28 días según lo estipulado en la Norma para determinar la resistencia característica. Pasado ese tiempo, se procede a realizar ensayos preliminares en el mismo laboratorio:

Ensayo de Flexión.
Ensayo de Compresión.

Se recopilan los datos de ensayo para comparar su comportamiento mecánico en cada diseño. Finalmente es necesario establecer unas conclusiones y recomendaciones que se puedan aportar en futuras investigaciones.

3.2.1. MATERIALES.

3.2.1.1. ÁRIDOS.

La arena y la grava usadas en esta investigación son proporcionados por el laboratorio, distinguidos cada uno por su granulometría. Se han usado distintos tamaños según la fibra utilizada, ya que el largo de la fibra debe ser mayor de 2,5 veces el tamaño del árido para llegar a envolverlo:

Tipo de fibra	Molde (cm)	Árido	Tamaño
Fibra de vidrio	10x10x40	Arena	0-4mm
		Grava	4-8mm
Fibra de poliolefina	15x15x60	Arena	0-4mm
		Grava	4-12,5mm

Tabla 3. Tamaños de fibra según molde.

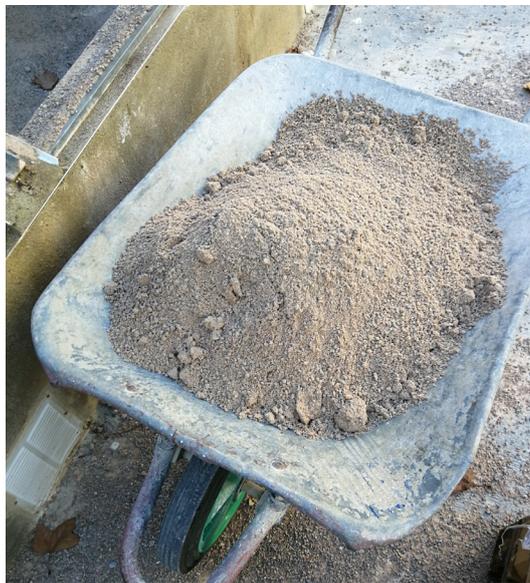


Imagen 10. Arena fina del laboratorio.



Imagen 11. Grava del laboratorio.

3.2.1.5. FIBRAS DE VIDRIO AR.

La fibra de vidrio es proporcionada por la empresa Fibratec (Fibra AR V-12 AM)^[11]

P. Comercial		FIBRA AR V-12 AM					
Casa	Fibras de vidrio						
FIBRATEC	Color	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (kg/dm ³)	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo elástico (Gpa)	Resistencia ácidos/álcalis
	Blanco	12	0,015	2,68	1620	74	AR (17,1% en ZrO ₂)
NORMA	Dosificaciones	Suministro	Punto de fusión	Alargamiento a la rotura	Módulo de balasto (T/m ³)	Áridos	
<u>UNE 15422</u>	1-3kg/m ³ h	Bolsas de 1kg o sacos de 20kg	1500°C	165mm	2500	<20 mm	

Prestaciones

- 1 Eleva la resistencia a primera rotura en un 5% - 15% en dosificación recomendada.
- 2 Resiste los ataques químicos de los álcalis del hormigón y mortero.
- 3 Es capaz de coser todas las microfisuras durante el proceso de curado del hormigón.
- 4 Se reparte de forma homogénea sin dejar rastro en la superficie.
- 5 No absorbe agua. No es necesario añadir más a la masa.
- 6 Permite sustituir el mallazo electrosoldado en la construcción de soleras.
- 7 No pierde ninguna característica con el paso de los años, permaneciendo intacto y aportando flexibilidad y resistencia que su solera requiere.

Tabla 4. Propiedades de la fibra de vidrio utilizada.



Imagen 13. Fibra de vidrio.

3.2.1.6. FIBRAS DE POLIOLEFINA.

La fibra de poliolefinas es proporcionada por la empresa Mapei (Fibra MB65).^[15]

P. Comercial		MAPFIBRE MB65				
Casa	Fibras de poliolefinas					
MAPEI	Color	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Densidad (kg/dm ³)	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo elástico (Gpa)
	Gris	65	0,85	1	560	7,5
NORMA	Dosificaciones	Suministro	Punto de fusión	Absorción de agua (%)	Resistencia ácidos/álcalis	
<u>UNE 14889-2</u>	1-5kg/m ³ h	Bolsas de 6kg	160°C	<0,01	Total	

Prestaciones

- 1 Elevada adhesión con la pasta de cemento gracias a su superficie en relieve.
- 2 Son resistentes a los ambientes alcalinos, aportando durabilidad a lo largo del tiempo.
- 3 Empleo en hormigones proyectados o prefabricados para estructuras resistentes al fuego.
- 4 Reducen los fenómenos de "spalling" (desprendimiento)
- 5 Las macrofibras tienen capacidad de absorber energía y mejorar la resistencia residual a flexotracción para aberturas de 0,5mm y 2,5mm, incluso con aberturas superiores a 3,5mm.
- 6 Tienen baja absorción a la humedad.
- 7 Se distribuyen de manera homogénea en la masa de hormigón.
- 8 Pueden sustituir parcial o total de armaduras pasivas en elementos estructurales sometidos a tracción.

Tabla 5. Propiedades de la fibra de poliolefina utilizada.



Imagen 14. Fibra de poliolefina (polipropileno).

3.2.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Para realizar ordenadamente este trabajo, por la cierta complejidad que conlleva, es conveniente identificar las probetas para tener controlado el hormigón patrón y el hormigón con cada porcentaje de fibra. Para ello se elabora una tabla que recoge el código de cada probeta. El código de cada probeta refleja el número de dosificación, el número de amasada y de probeta.

HORMIGONES PATRÓN				
Nº DOSIFICACIÓN	Nº AMASADA	Nº PROBETA	CÓDIGO	DOSIFICACIÓN FIBRA
Hormigón patrón 1 para la fibra de vidrio.				
1	1	A	11A	0 kg/m ³ h
		B	11B	
		C	11C	
Hormigón patrón 2 para la fibra de poliolefina.				
2	1	A	21A	0 kg/m ³ h
		B	21B	
	2	A	22A	
		B	22B	
	3	A	23A	
		B	23B	

Tabla 6. Identificación de probetas de cada hormigón patrón.

HORMIGÓN CON FIBRA DE VIDRIO				
Nº DOSIFICACIÓN	Nº AMASADA	Nº PROBETA	CÓDIGO	DOSIFICACIÓN FIBRA
3	1	A	31A	1kg/m ³ h
		B	31B	
		C	31C	
4	1	A	41A	3kg/m ³ h
		B	41B	
		C	41C	

Tabla 7. Identificación de probetas del hormigón reforzado con fibras de vidrio.

HORMIGÓN CON FIBRA DE POLIOLEFINA

Nº DOSIFICACIÓN	Nº AMASADA	Nº PROBETA	CÓDIGO	DOSIFICACIÓN FIBRA
5	1	A	51A	1 kg/m³h
		B	51B	
	2	A	52A	
		B	52B	
	3	A	53A	
		B	53B	
6	1	A	61A	3 kg/m³h
		B	61B	
	2	A	62A	
		B	62B	
	3	A	63A	
		B	63B	
7	1	A	71A	5 kg/m³h
		B	71B	
	2	A	72A	
		B	72B	
	3	A	73A	
		B	73B	
8	1	A	81A	7 kg/m³h
		B	81B	
	2	A	82A	
		B	82B	
	3	A	83A	
		B	83B	

Tabla 8. Identificación de probetas del hormigón reforzado con fibras de poliolefina.

CAPITULO 4. PROCEDIMIENTO OPERATIVO DE ENSAYO

4.1. DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN.

Para realizar esta investigación se parte de un hormigón de referencia designado como “hormigón patrón”. Al usar macro/micro-fibra de diferente longitud, se decide cambiar el tamaño de la grava para poder conseguir una adhesión óptima de la fibra con el hormigón.

HORMIGÓN PATRÓN 1 SOBRE EL QUE SE DOSIFICA LA FIBRA DE VIDRIO 12MM:

Diseño del hormigón patrón			
Probeta	10x10x40 cm		
Material	Masa (g)	Densidad (g/ml)	Volumen (ml)
CEM I 42,5	400	3,1	129,0
Agua (w/c=0,5)	200	1	200,0
Aditivo 5%	2,0	1,05	1,9
Arena 0-4 65%	1196	2,65	694,1
Grava 4-8 35%	644	2,65	694,1
	2441		1025

Tabla 9. Diseño del hormigón patrón para la fibra de vidrio.

HORMIGÓN PATRÓN 2 SOBRE EL QUE SE DOSIFICA LA FIBRA DE POLIOLEFINA 65MM:

Diseño del hormigón patrón			
Probeta	15x15x60 cm		
Material	Masa (g)	Densidad (g/ml)	Volumen (ml)
CEM I 42,5	375,00	3,1	120,97
Agua (w/c=0,5)	187,50	1	187,50
Aditivo 5%	1,88	1,05	1,79
Arena 0-4 60%	1136,45	2,65	714,75
Grava 4-12.5 40%	757,63	2,65	714,75
	2458		1025

Tabla 10. Diseño del hormigón patrón para la fibra de poliolefina.

4.2. AMASADO

El procedimiento de amasado se establece en base a los tiempo de adición de cada fibra y a la velocidad de la amasadora. La **amasadora** que se utiliza es de **eje central vertical con tambor móvil**. La formación de erizos se reduce con una buena dosificación de árido fino pero aumenta cuando el contenido de fibras es elevado y son muy esbeltas. Se establece un tipo en común de amasado para el hormigón tradicional y para el hormigón fibroreforzado.



Imagen 15. Amasadora de tambor móvil.

Antes de amasar se tienen todos los **materiales pesados y con la humedad corregida**.

Para determinar el contenido de agua libre en los áridos, en superficie o en poros, se realiza el **método de secado en estufa**. Se calcula por diferencia entre las masas húmeda y seca de la muestra de ensayo y se expresa en forma de porcentaje respecto de la masa seca de la muestra de ensayo, a partir de la siguiente ecuación:

$$w = ((M_1 - M_3)/M_3) \times 100$$

M_1 masa de la muestra de ensayo (en gramos)

M_3 masa de la muestra seca (en gramos)

La humedad se aproxima a la décima más próxima (0,1%)



Imagen 16. Secado de arena en estufa.

Para la elaboración de cada amasada se sigue un **PROCEDIMIENTO** indicado en la norma **UNE 14845-1**:

- 1º** Se prepara un lote de hormigón cuyo volumen debe estar comprendido entre el 50% y el 90% de la capacidad mezcladora.
- 2º** Se vierten todos los áridos secos en el depósito de la mezcladora, se añade la mitad del agua y se mezcla durante 2 minutos.
- 3º** Se lleva a cabo la mezcla y se añade el cemento y el resto de agua que contenga los posibles aditivos durante el minuto siguiente. El tiempo total de mezclado no debe ser superior a 5 minutos.

Según la EHE-08^[5] la fibra se debe incorporar en el momento de añadir los áridos, preferentemente del árido grueso, al inicio del amasado, desaconsejándose como primer componente de la mezcla.

En esta investigación se siguen las recomendaciones del fabricante, **añadiéndose las fibras al final de la elaboración de la mezcla**. El vertido de las fibras se realiza según lo estipulado en la norma, lentamente, entre 20 y 60kg/minuto con la cuba girando a su máxima velocidad hasta garantizar la distribución homogénea de las fibras del hormigón evitando la formación de “erizos” o “pelotas” en el hormigón.^[5]



Imagen 17. Materiales pesados y preparados.
(1) Agua (2) Cemento (3) Arena (4) Grava
(5) Fibra de vidrio



Imagen 18. Cemento con arena en la amasadora.



Imagen 19. Mezcla de hormigón antes de añadirle la fibra.



Imagen 20. Añadiendo las fibras de poliolefina.



Imagen 21. Añadiendo las fibras de vidrio.

CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN:

El control de la **consistencia** del hormigón fresco se realiza mediante el método del **cono de Abram's**. La selección del tipo y dosificación de las fibras dependerá de su efectividad y de su influencia en la consistencia del hormigón. Las fibras esbeltas y altas dosificaciones supone un aumento de su eficiencia mecánica, pero puede provocar un descenso de la consistencia.



Imagen 22. Cono de Abram's.



Imagen 23. Llenado de la primera capa del cono de Abram's.



Imagen 24. Retirada del cono.



Imagen 25. Asiento de la masa.



Imagen 26. Medida del asiento ($h=22\text{cm}$).

Para realizar el ensayo de consistencia mediante el cono de Abram's se sigue el **procedimiento** según lo regulado en la norma **UNE EN 12350-2:2020**:

- Se llena el cono en 3 capas de modo que cada una ocupe $1/3$ de la altura del cono una vez compactado. Se compacta cada capa con 25 golpes con la barra de compactación.
- En el llenado y compactación de la última capa se procura que el hormigón rebose antes de comenzar el proceso de compactación, teniendo que haber exceso de nivel por la parte superior del cono.
- Posteriormente se enrasa la superficie de hormigón por medio de una acción de corte y rodillo.
- Se retira el cono levantándolo con cuidado verticalmente en un tiempo rápido de 2 a 5 segundos, de forma uniforme sin alterar el hormigón.
- Inmediatamente después de retirar el cono se registra el asentamiento h , diferencia entre la altura del cono y la del punto más alto de la masa del hormigón asentada (medido en la imagen 21).

La consistencia del hormigón cambia con el tiempo debido al contenido de agua retenida en la matriz. Por cada amasada se debe realizar un ensayo de consistencia para que sean comparables, pero debido a que se han hecho por tandas, se considera que no ha variado apenas la consistencia entre cada amasada.

Se puede observar que el **asiento** del hormigón es **SIMÉTRICO**, permaneciendo sustancialmente intacto, por lo que se considera válido teniendo la suficiente plasticidad y cohesión para realizar las probetas. La **consistencia** obtenida del hormigón fresco, según la norma citada anteriormente y la EHE-08^[5], se considera **LÍQUIDA (L)** con un asentamiento de **22cm**.

MOLDES

Se utilizan dos moldes de tipo prismático para la elaboración de las probetas ya que la dimensión de la probeta debe ser 3 veces más ancho que el tamaño del árido grueso y 2 veces que la dimensión máxima de la fibra.

Se deben verificar que estén bien limpios, ligeramente engrasados y bien cerrados antes de su uso. Se compacta con ayuda del vibrador en tres capas hasta conseguir una superficie nivelada, enrasada con la llana de metal. Se realiza además un vibrado externo para conseguir la lechada característica al compactarse. Los tiempo de compactación son cortos, de aproximadamente 10 segundos, para evitar dañar las fibras.

• MOLDE PRISMÁTICO DE 100MM X 100MM X 400MM.

Para confeccionar el hormigón patrón con fibra de vidrio se usan moldes pequeños de 4 litros. Se observa que al ser fibra corta es necesario reducir el tamaño del árido fino para conseguir la fibra lo envuelva.



Imagen 27. Moldes prismáticos de 4L.

• MOLDE PRISMÁTICO DE 150MM X 150MM X 600MM.

Para confeccionar el hormigón con fibra de poliolefina se utiliza un molde mayor, de 13,5 litros.



Imagen 28. Moldes prismáticos de 13,5L.

HORMIGÓN FRESCO VERTIDO EN LOS MOLDES

Se presentan algunas imágenes representativas de las probetas de hormigón en estado fresco, patrón 1 y con fibras de vidrio y de poliolefina.



Imagen 29. Hormigón vertido en los moldes para las probetas del hormigón patrón 1 (11A, 11B).



Imagen 30. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 31A, 31B y 31C.



Imagen 31. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 61A y 61B.



Imagen 32. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 62A y 62B.



Imagen 33. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 63A y 63B.

4.3. ENSAYOS MECÁNICOS.

Para la realización de estos ensayos se utilizan las máquinas de laboratorio que cumplen las especificaciones de la norma UNE 83304 capaz de aplicar la carga de ensayo con la velocidad especificada.

Todos los parámetros vienen previamente programados, solo es necesario introducir las dimensiones de la probeta y seleccionar el material a utilizar.

Todas las probetas pasan por los mismos ensayos y por el mismo orden.

1º ENSAYO: ROTURA POR FLEXIÓN SIMPLE. Se ensayan las probetas hasta su rotura.

2º ENSAYO: RESISTENCIA A COMPRESIÓN. Se ensayan ambas mitades de cada probeta hasta su rotura.

Las probetas se curan en moldes 24 horas después del vertido a una temperatura media de 20°C y pasan por un curado de 28 en condiciones húmedas en la cámara.



Imagen 34. Máquina para el ensayo de flexión. (2007).
Marca: Ibertest. **Modelo:** PEF150 HDA.
Estado de conservación: nº 462210.



Imagen 35. Máquina para el ensayo de compresión. (1998).
Marca: Ibertest. **Modelo:** MEH-1500 S.
Estado de conservación: W 121492.

4.3.1. ENSAYO DE ROTURA POR FLEXIÓN SIMPLE.

Con el ensayo de rotura por flexión simple se puede conocer la resistencia a tracción por flexión del hormigón con fibras, el límite de proporcionalidad y las resistencias residuales a tracción por flexión.

El comportamiento de las fibras se evalúa con la **curva carga-desplazamiento** del borde de fisura o de la carga-flecha, obtenida aplicando una carga puntual centrada sobre un prisma.

No se realiza la entalla sobre las probetas debido a las limitaciones del laboratorio.

Para este ensayo se utiliza una **prensa de flexión modelo PEF150 HDA (imagen 34)**, un equipo de adquisición (EAD), transductores de fuerza (célula de carga) y desplazamiento (captador extenso métrico) y el software de recopilación de datos de la computadora central.

Este ensayo se hace con **apoyo sobre dos puntos, aplicando carga con dos rodillos**, como se puede ver a continuación:

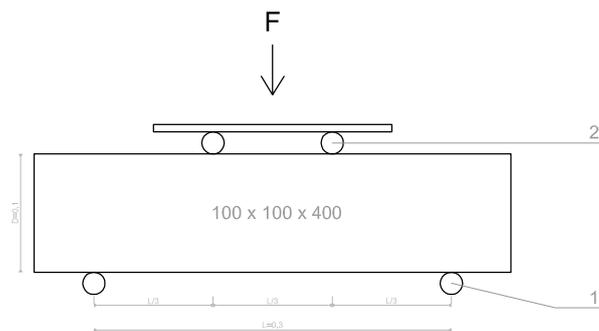


Imagen 36. Posición de la probeta de 4L.
1. Rodillo de apoyo fijo. 2. Rodillo de carga.

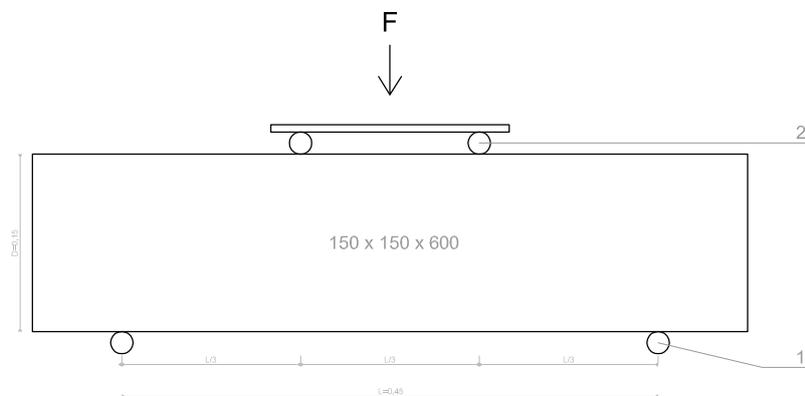


Imagen 37. Posición de la probeta de 13,5L.
1. Rodillo de apoyo fijo. 2. Rodillo de carga.



Imagen 38. Ensayo de flexión. Probeta en carga. (41B).



Imagen 39. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (41B).



Imagen 40. Ensayo de flexión. Probeta en carga. (52A).



Imagen 41. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (52A).



Imagen 42. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (72B).



Imagen 43. Ensayo de flexión. Fisura. (72B).



Imagen 44. Ensayo de flexión. Rotura. (81B).



Imagen 45. Ensayo de flexión. Fisura. (81B).

4.3.2. ENSAYO DE ROTURA POR COMPRESIÓN.

Con el ensayo de rotura por compresión se puede conocer la resistencia a compresión del hormi-
gón con fibras. El comportamiento se evalúa **curvas de fuerza-tiempo**. En este ensayo se aplica
una carga repartida sobre su superficie lisa.

Para este ensayo se utiliza una **máquina de prueba universal de compresión modelo MEH-1500
S (imagen 35)** y un software de recopilación de datos de la computadora central.

Para obtener resultados consistentes se establece un plan de ensayos, realizándose previamente
el de rotura por flexión para posteriormente ensayar cada mitad por compresión.

A continuación se muestran algunas fotos representativas de las probetas ensayadas a compre-
sión:



Imagen 46. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (11C, izq.)



Imagen 47. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (11C, izq.)



Imagen 48. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (11C, izq., vista de perfil)



Imagen 49. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (51A, izq.)



Imagen 50. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (61A, izq.)



Imagen 51. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (71A, izq.)



Imagen 52. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (81A, izq.)

CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS.

5.1. RESULTADO DE LOS ENSAYOS.

En este capítulo se muestran los resultados de los dos tipos de ensayos realizados con dos tipos de hormigones. Los hormigones se han dosificado consiguiendo una consistencia fluida (cono de 22cm) y los áridos se han modificado con la adición de fibras variando muy poco uno de otro (capítulo 4.1., pág. 32).

El **número de probetas** de cada amasada depende de la dosificación de cada hormigón patrón:

- Para el hormigón reforzado con **fibra de vidrio** se usa un árido fino, con realizar **3 probetas por amasada** es válido para determinar su resistencia media.

- Para el hormigón reforzado con **fibra de poliolefina** se usa un árido grueso mayor, aportando más resistencia, siendo válido realizar **2 probetas por amasada**.

El valor de **tensión de rotura** la aporta el ordenador central a partir de la siguiente fórmula según EHE^[5]:

$$f_{cf} = (F \times L) / (d_1 \times d_2^2)$$

Siendo F, la fuerza de rotura en Newton (N); L, distancia entre apoyos en mm; d1, ancho de la probeta (mm); d2, canto de la probeta (mm). (Ver pág. 43).

PROBETA Prismática				
Ancho (dm)	Alto (dm)	Larg (dm)	Vol (dm ³ =L)	Peso (kg)
1	1	4	4	9,8

Dosificación Nº 1
 Nombre Hormigón patrón 1. Fecha 22/12/2020
 Kg fibra/ m3 0

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
11A	26,30	7,89	631,60	63,16
			532,40	61,00
11B	27,40	8,22	634,60	63,46
			636,00	63,60
11C	21,62	7,40	631,50	63,15
			621,60	62,16

Tabla 11. Resultado de ensayos de la dosificación nº 1: hormigón patrón 1.

PROBETA Prismática				
Ancho (dm)	Alto (dm)	Larg (dm)	Vol (dm ³ =L)	Peso (kg)
1,5	1,5	6	13,5	33,08

Dosificación Nº 2
 Nombre Hormigón patrón 2. Fecha 21/12/2020
 Kg fibra/ m3 0

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
21A	61,57	8,21	1230,40	54,68
			1297,60	57,67
21B	52,38	6,98	1240,20	55,12
			1294,60	57,54
22A	64,01	8,53	1322,90	58,80
			1257,90	55,91
22B	56,42	7,52	1312,70	58,34
			1270,30	56,46
23A	52,69	7,02	1145,50	50,91
			1092,10	48,54
23B	50,98	6,80	1291,50	57,40
			1287,00	57,20

Tabla 12. Resultado de ensayos de la dosificación nº 2: hormigón patrón 2.

Dosificación N° 3
 Nombre Hormigón con fibra de vidrio.
 Kg fibra/ m3 1
 Fecha 22/12/2020

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
31A	27,75	8,32	634,80	63,48
			663,50	66,35
31B	23,17	7,50	632,20	63,22
			636,40	63,64
31C	26,81	8,04	645,50	64,85
			632,20	63,22

Tabla 13. Resultado de ensayos de la dosificación nº 3.

Dosificación N° 4
 Nombre Hormigón con fibra de vidrio.
 Kg fibra/ m3 3
 Fecha 22/12/2020

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
41A	31,03	9,31	639,10	63,91
			644,00	64,40
41B	30,71	9,21	584,40	58,44
			602,90	60,29
41C	31,73	9,52	567,80	60,78
			620,40	62,04

Tabla 14. Resultado de ensayos de la dosificación nº 4.

Dosificación N° 5
 Nombre Hormigón con fibra de poliolefina.
 Kg fibra/ m3 1
 Fecha 11-12-13/01/2021

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
51A	52,45	6,99	1151,00	51,16
			1162,40	51,66
51B	54,47	7,26	1174,60	52,20
			1173,50	52,15
52A	45,96	6,13	1182,90	52,57
			1147,60	51,01
52B	43,77	5,84	1127,80	50,12
			1146,40	50,95
53A	53,75	7,17	1252,30	55,66
			1134,00	50,40
53B	41,62	5,55	1254,50	55,76
			1161,50	51,62

Tabla 15. Resultado de ensayos de la dosificación nº 5.

Dosificación N° 6
 Nombre Hormigón con fibra de poliolefina.
 Kg fibra/ m3 3
 Fecha 11-12-13/01/2021

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
61A	51,17	6,82	1225,80	54,48
			1115,80	49,59
61B	52,76	7,04	1194,40	53,08
			1247,20	55,43
62A	46,24	6,17	1195,60	53,14
			1158,30	51,48
62B	45,49	6,07	1187,60	52,78
			1239,90	55,11
63A	47,69	6,36	1329,30	59,08
			1313,90	58,40
63B	41,65	5,55	1296,70	57,63
			1335,80	59,37

Tabla 16. Resultado de ensayos de la dosificación nº 6.

Dosificación N° 7
 Nombre Hormigón con fibra de poliolefina.
 Kg fibra/ m3 5
 Fecha 11-12-13/01/2021

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
71A	41,81	5,58	1255,10	55,78
			1213,00	53,91
71B	54,20	7,23	1178,90	52,40
			1183,20	52,59
72A	47,27	6,30	1186,80	55,75
			1205,90	53,59
72B	44,82	5,98	1260,10	56,00
			1265,30	56,24
73A	46,40	6,19	1379,30	61,30
			1318,30	58,59
73B	52,07	6,94	1388,00	61,69
			1392,50	61,89

Tabla 17. Resultado de ensayos de la dosificación n° 7.

Dosificación N° 8
 Nombre Hormigón con fibra de poliolefina.
 Kg fibra/ m3 7
 Fecha 23/03/2021

Probetas (por ensayo)	FLEXION		COMPRESIÓN	
	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)
81A	43,81	5,84	1140,40	52,43
			1169,10	53,38
81B	46,71	6,23	1180,50	54,28
			1158,50	52,18
82A	44,05	5,37	1083,60	48,16
			1052,70	46,79
82B	44,66	5,95	1135,50	51,15
			1120,90	49,82
83A	53,83	7,18	1146,40	50,95
			1184,60	52,65
83B	57,42	7,66	1182,80	52,57
			1191,30	52,95

Tabla 18. Resultado de ensayos de la dosificación n° 8.

Dado que la dosificación del hormigón patrón 1 es distinta al hormigón patrón 2, es necesario corregir los valores para poder comparar y poder sacar conclusiones. Es lógico que el patrón se acerque al hormigón con 1kg de fibras/m³.

Además, según la EHE-08^[5] la resistencia de una amasada es la media aritmética de los resultados obtenidos de ensayo hasta rotura de al menos 2 probetas.

Cuando se realizan **2 probetas** se admite que el hormigón de cada amasada es homogéneo si el recorrido relativo de las resistencia obtenidas en cada probeta es inferior al 13%.

$$RR = (f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}) / f_{\text{media}} \quad (<0,13)$$

En el caso de **3 probetas** de una misma amasada el recorrido relativo tiene que ser inferior al 20%.

$$RR = (f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}) / [(f_1 + f_2 + f_3) / 3] \quad (<0,20)$$

En el supuesto que no se verifique la relación anterior se considera ensayo nulo, y se desecha la amasada.

Por lo tanto es necesario preparar los datos para una posterior conclusión.

Hormigón patrón 1		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
11A	7,89	63,16	61	62,08	0,03	
11B	8,22	63,46	63,6	63,53	0,00	
11C	7,4	63,15	62,16	62,66	0,02	
σ media	7,84	RR (<0,2)			RRm	
		0,10			0,02	

Hormigón patrón 2		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
21A	8,21	54,68	57,67	56,18	0,05	
21B	6,98	55,12	57,63	56,375	0,04	
σ media	7,60	RR (<0,2)			RRm	
		0,16			0,05	
22A	8,53	58,8	55,91	57,36	0,05	
22B	7,52	58,34	56,45	57,40	0,03	
σ media	8,03	RR (<0,2)			RRm	
		0,13			0,04	
23A	7,02	50,9	48,53	49,715	0,05	
23B	6,80	57,39	57,2	57,30	0,00	
σ media	6,91	RR (<0,2)			RRm	
		0,03			0,03	

Dosificación nº 3		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
31A	8,32	66,35	63,48	64,92	0,04	
31B	7,5	63,64	63,22	63,43	0,01	
31C	8,04	64,85	63,22	64,04	0,03	
σ media	7,95	RR (<0,2)			RRm	
		0,10			0,03	

Dosificación nº 4		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
41A	9,31	64,4	63,91	64,16	0,01	
41B	9,21	60,29	58,44	59,365	0,03	
41C	9,52	62,04	60,78	61,41	0,02	
σ media	9,35	RR (<0,2)			RRm	
		0,01			0,02	

Dosificación nº 5		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
51A	6,99	51,66	51,15	51,41	0,01	
51B	7,26	52,2	52,15	52,175	0,00	
σ media	7,13	RR (<0,2)			RRm	
		0,04			0,01	
52A	6,13	52,57	51,01	51,79	0,03	
52B	5,84	50,95	50,12	50,54	0,02	
σ media	5,99	RR (<0,2)			RRm	
		0,05			0,02	
53A	7,17	55,66	50,4	53,03	0,10	
53B	5,55	55,75	51,62	53,69	0,08	
σ media	6,36	RR (<0,2)			RRm	
		0,25			0,09	

Dosificación nº 6		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
61A	6,82	54,48	49,59	52,04	0,09	
61B	7,04	55,43	53,08	54,255	0,04	
σ media	6,93	RR (<0,2)			RRm	
		0,03			0,07	
62A	6,17	53,14	51,48	52,31	0,03	
62B	6,07	55,1	52,78	53,94	0,04	
σ media	6,12	RR (<0,2)			RRm	
		0,02			0,04	
63A	6,36	59,08	53,89	56,485	0,09	
63B	5,55	59,36	57,63	58,50	0,03	
σ media	5,96	RR (<0,2)			RRm	
		0,14			0,06	

Dosificación nº 7		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
71A	5,58	55,78	53,91	54,85	0,03	
71B	7,23	52,58	52,39	52,485	0,00	
σ media	6,41	RR (<0,2)			RRm	
		0,26			0,02	
72A	6,3	55,74	53,59	54,67	0,04	
72B	5,98	56,23	56	56,12	0,00	
σ media	6,14	RR (<0,2)			RRm	
		0,05			0,02	
73A	6,19	61,3	58,59	59,945	0,05	
73B	6,94	61,88	61,68	61,78	0,00	
σ media	6,57	RR (<0,2)			RRm	
		0,11			0,02	

Dosificación nº 8		FLEXIÓN		COMPRESIÓN		
Id. Probeta	Tensión (Mpa)	Tensión (Mpa)		Tensión media	RR (<0,13)	
81A	5,84	53,38	52,43	52,91	0,02	
81B	6,23	54,28	52,48	53,38	0,03	
σ media	6,04	RR (<0,2)			RRm	
		0,06			0,03	
82A	5,37	48,16	46,79	47,48	0,03	
82B	5,95	51,15	49,82	50,49	0,03	
σ media	5,66	RR (<0,2)			RRm	
		0,10			0,03	
83A	7,18	52,65	50,95	51,8	0,03	
83B	7,66	52,95	52,57	52,76	0,01	
σ media		RR (<0,2)			RRm	

Tabla 19. Tensiones medias y recorridos relativos de todas las probetas.

Nº dosificación	Tensión media (Mpa)		Recorridos relativos	
	Flexión	Compresión	Flexión	Compresión
1	7,84	62,76	0,10	0,02
2	6,76	50,65	0,11	0,04
3	7,95	64,13	0,10	0,03
4	9,35	61,64	0,01	0,02
5	6,49	52,10	0,11	0,04
6	6,34	54,59	0,06	0,06
7	6,37	56,64	0,14	0,02
8	6,37	51,47	0,08	0,02

Tabla 20. Tensiones para discusión.
Hormigón con fibra de vidrio de 12mm: dosificaciones nº 3 y 4.
Hormigón con fibra de poliolefina de 64mm: dosificaciones nº 5, 6, 7 y 8.

Con esta consideración se puede afirmar que con los datos obtenidos:

HORMIGÓN CON FIBRA DE VIDRIO

- Mayor dispersión en flexión que en compresión.
- Aumenta puntualmente la resistencia a flexión. Para confirmar se deberían tener valores de al menos 3 amasadas por grupo.

HORMIGÓN CON FIBRA DE POLIOLEFINA

- El ensayo de flexión produce tres veces más dispersión que el de compresión.
- La resistencia a flexión tiene un recorrido bastante más alto que de la compresión (0,11 frente a 0,04). Se puede decir que no hay mejora mecánica.
- Aumento de resistencia a compresión de la dosificación 5 respecto de la dos. 2 en un 2,9%.
- Aumento de resistencia a compresión de la dosificación 6 respecto de la dos. 2 en un 7,8%.
- Aumento de resistencia a compresión de la dosificación 7 respecto de la dos. 2 en un 11,8%.
- Aumento de resistencia a compresión de la dosificación 8 respecto de la dos. 2 en un 1,60%.

Aunque el estudio es limitado sí que parece ser evidente este aumento de resistencia a compresión al aumentar el porcentaje de fibras.

5.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS.

A continuación se analizan los ensayos a partir de las gráficas obtenidas en el laboratorio. Se toman las curvas carga-desplazamiento del ensayo de flexión y carga-tiempo del ensayo de compresión de las muestras más representativas (acercándose al valor medio de la cada dosificación), para evitar que el número de gráficas sea excesiva.

Mencionado anteriormente, **no se pudo realizar la entalla en las probetas** debido a que se estaba a la espera de cambiar la máquina durante la fase experimental.

Con estos ensayos se compara el comportamiento del hormigón sin fibras y con fibras a partir de los valores de **fuerza y desplazamiento relativo de la cara superior de las probetas**. No se puede conocer la apertura de la fisura (CMOD) puesto que no se pudo realizar la entalla, por lo que se comentan los análisis en base a fuerzas y desplazamientos.

Es necesario establecer un criterio de cálculo fundamentado en la **Mecánica de Fractura no-lineal para elementos finitos** para cuantificar la fisura y el efecto de cosido de la fibra (**“puenteo”**). Actualmente existen tres teorías básicas para poder conseguir datos de estos fenómenos:

**Teoría de Estadística de Resistencia al azar.
(Weibull, 1939)**

**Teoría de Redistribución de Esfuerzo y Energía de Fractura Liberada por grandes fisuras.
(Bazant, 1984)**

**Teoría de la Fisura Fractal.
(Carpintieri, 1990)**

TEORÍA DE BAZANT

Es la más aceptada para calcular la fisuración en el hormigón. Se basa en algunas hipótesis siendo la más importante que la energía liberada por la estructura es función de la longitud de la fractura y del tamaño de la zona de proceso de fractura (FPZ). A partir de las hipótesis pudo establecer la **ley del efecto tamaño (SEL)** que relaciona la resistencia nominal última con la resistencia a tracción del material y el tamaño característico del elemento a ensayar. Para calcular fisuración se debe consultar fuentes específicas sobre la Mecánica de Rotura.

ENSAYO DE FLEXIÓN

HORMIGÓN CON FIBRA DE VIDRIO

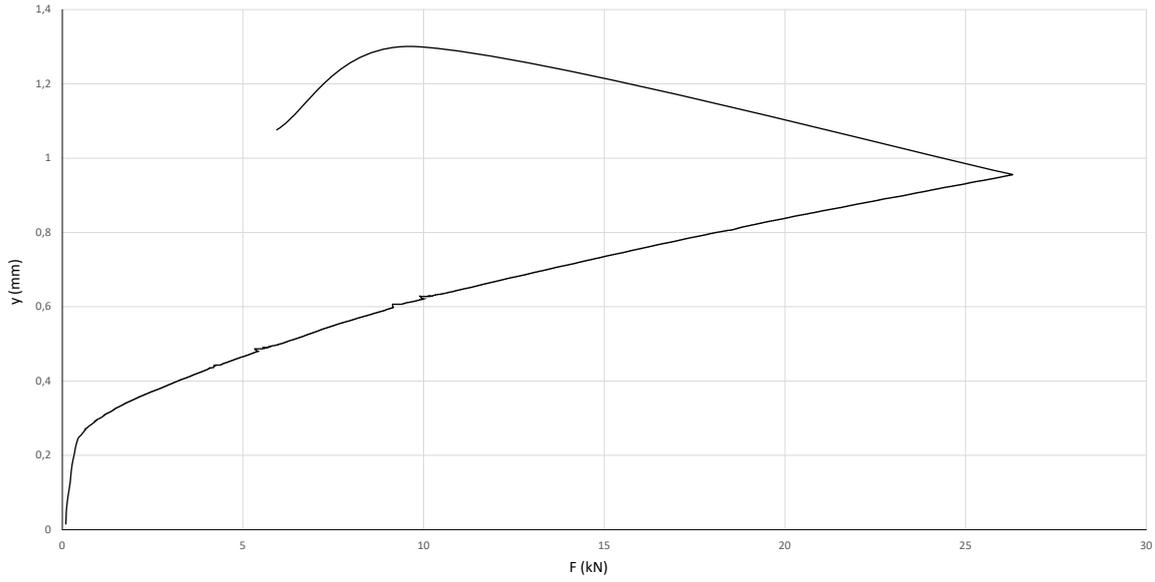


Imagen 53. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 11A.
t: 157,36''; F máxima: 26,30kN., y rotura: 0,95mm.

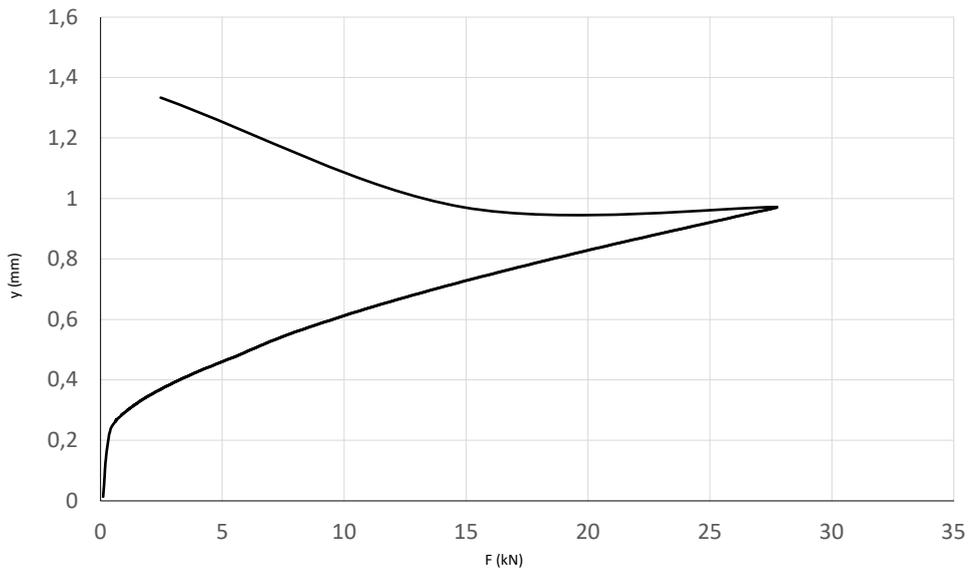


Imagen 54. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 31A.
t: 166,10''; F máxima: 27,75kN., y rotura: 0,97mm.

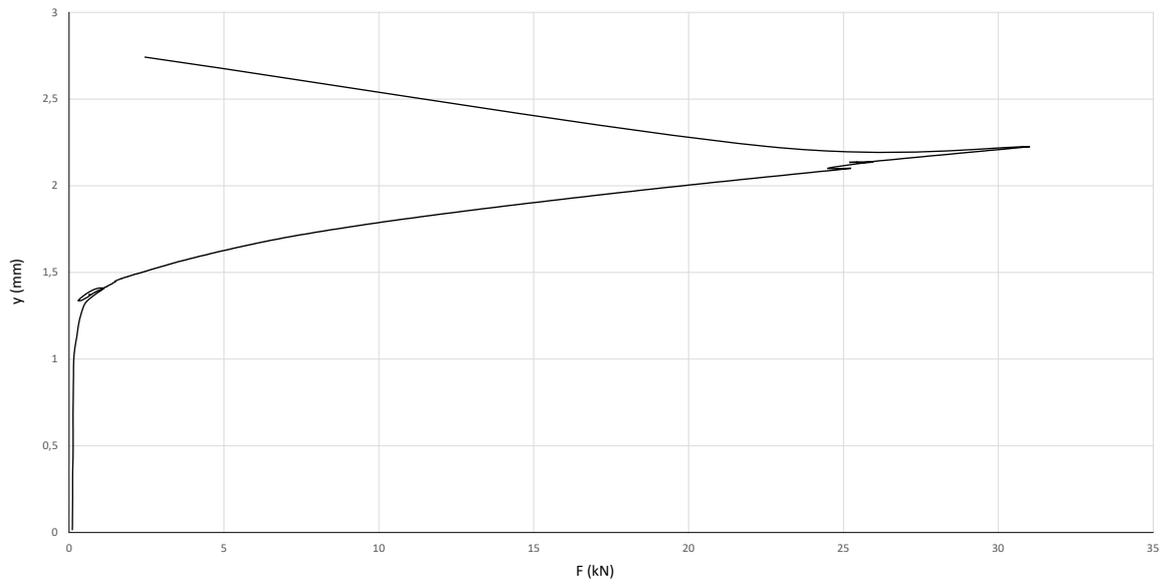


Imagen 55. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 41A.
t: 166,10''; **F máxima:** 27,75kN, **y rotura:** 2,22mm.

HORMIGÓN CON FIBRA DE POLIOLEFINA

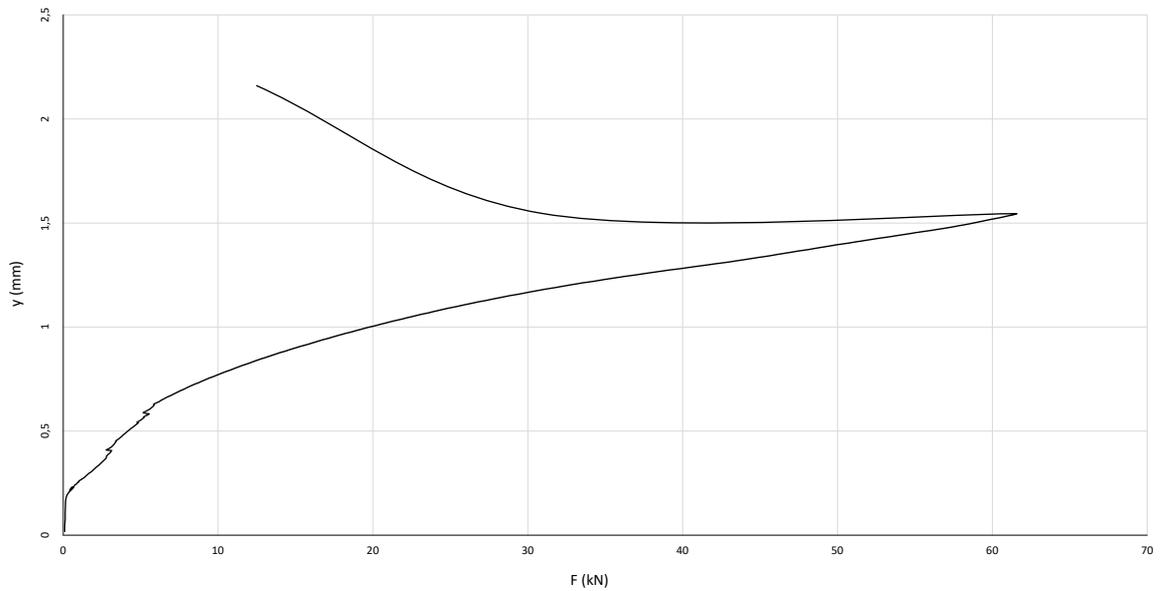


Imagen 56. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 21A.
t: 164,11''; **F máxima:** 61,57kN., **y rotura:** 1,54mm.

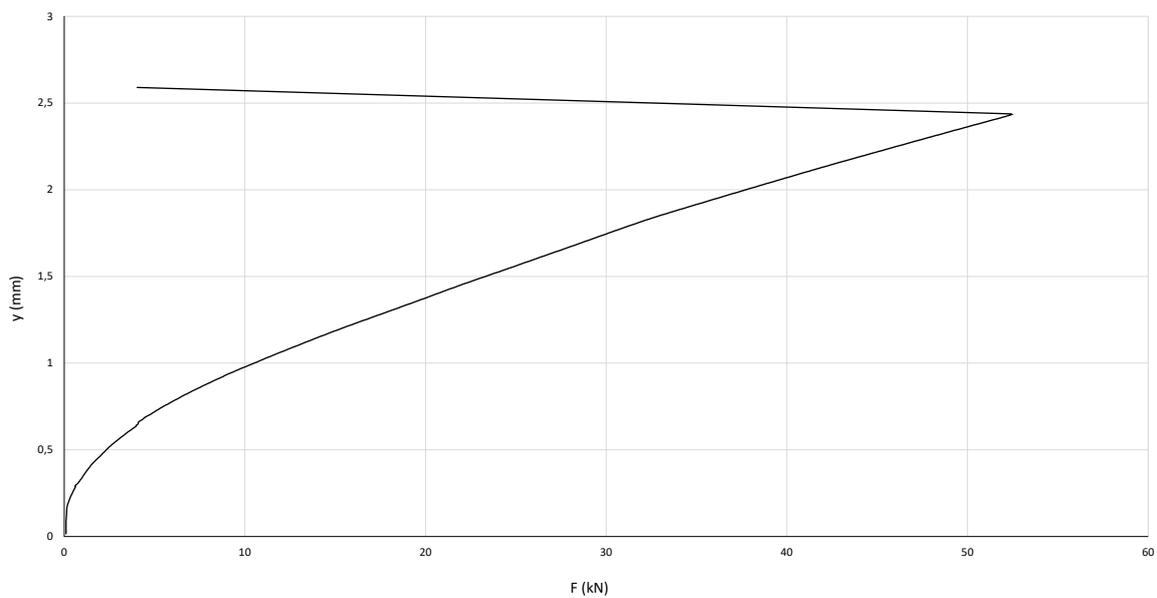


Imagen 57. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 51A.
t: 139,77"; **F máxima:** 52,43kN., **y rotura:** 2,44mm.

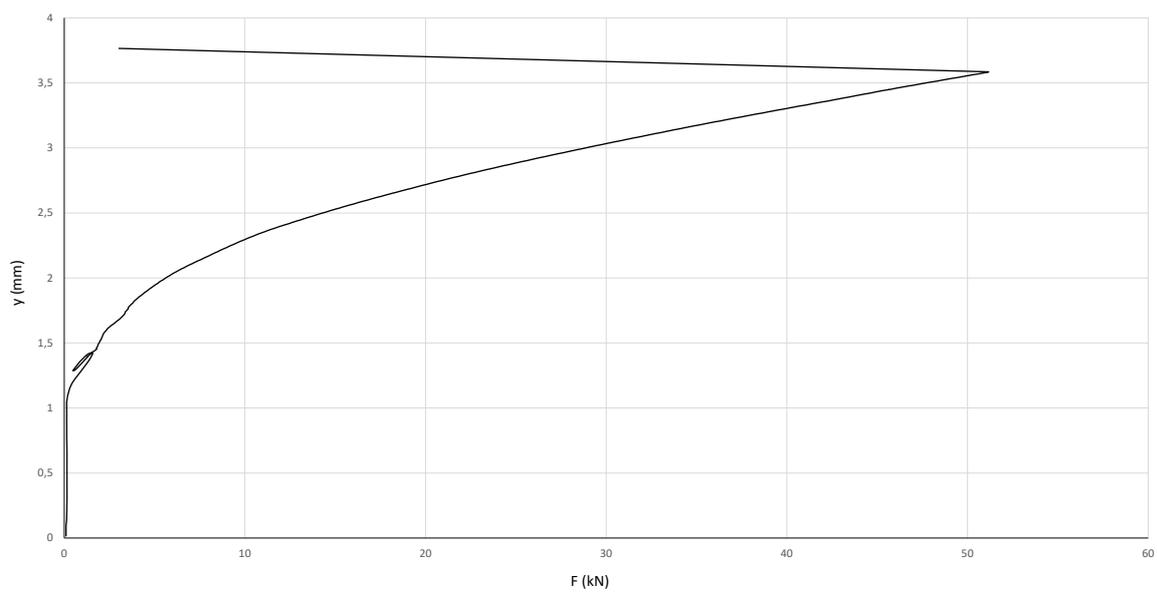


Imagen 58. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 61A.
t: 136,34"; **F máxima:** 51,15kN., **y rotura:** 3,58mm.

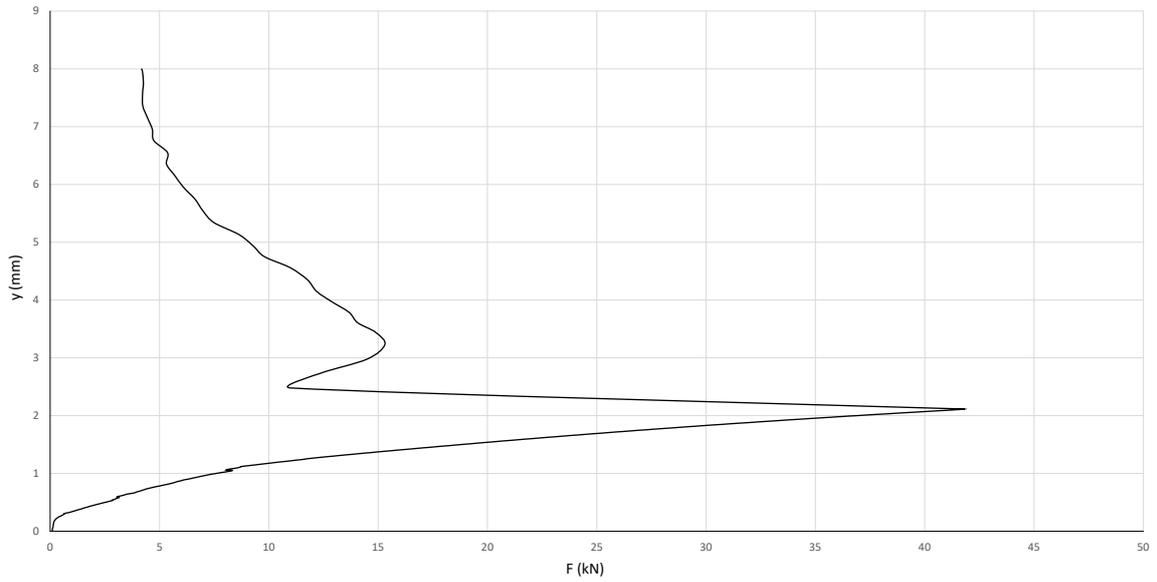


Imagen 59. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 71A.
t: 111,31''; F máxima: 41,80kN., y rotura: 2,12mm

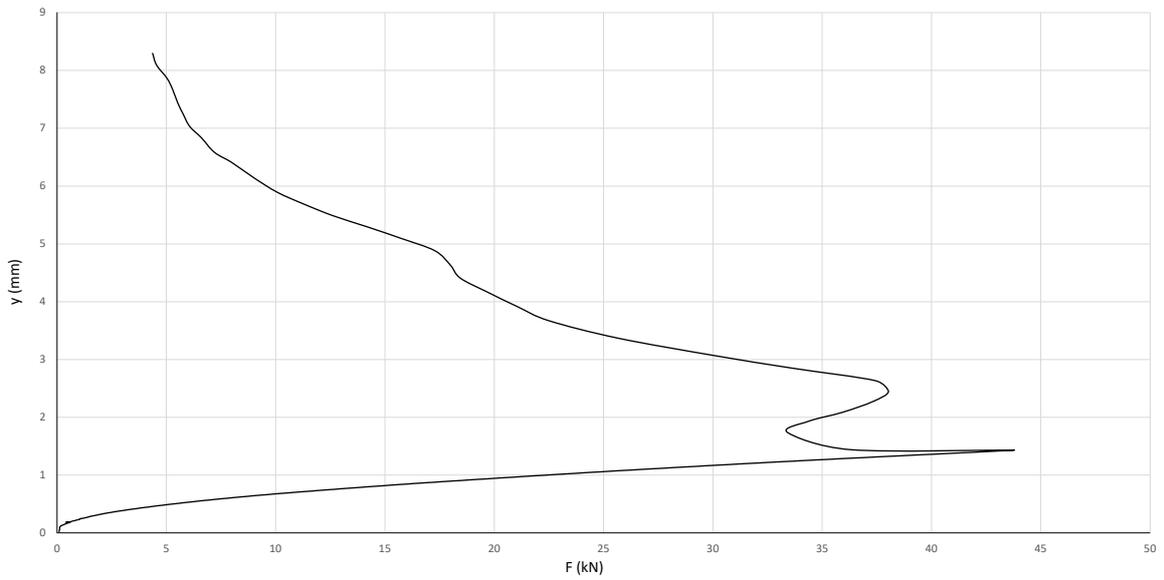


Imagen 60. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 81A.
t: 116,65''; F máxima: 43,77kN., y rotura: 1,43mm.

ENSAYO DE COMPRESIÓN

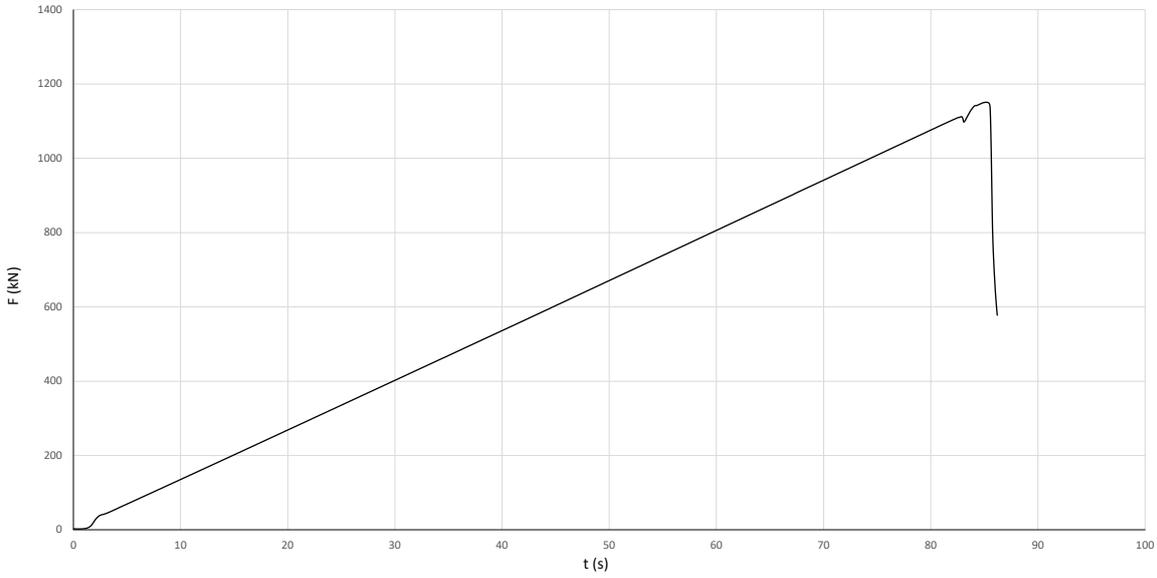


Imagen 61. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 51A.
t: 85,15''; F máxima: 1151kN, σ máxima: 51,16MPa.

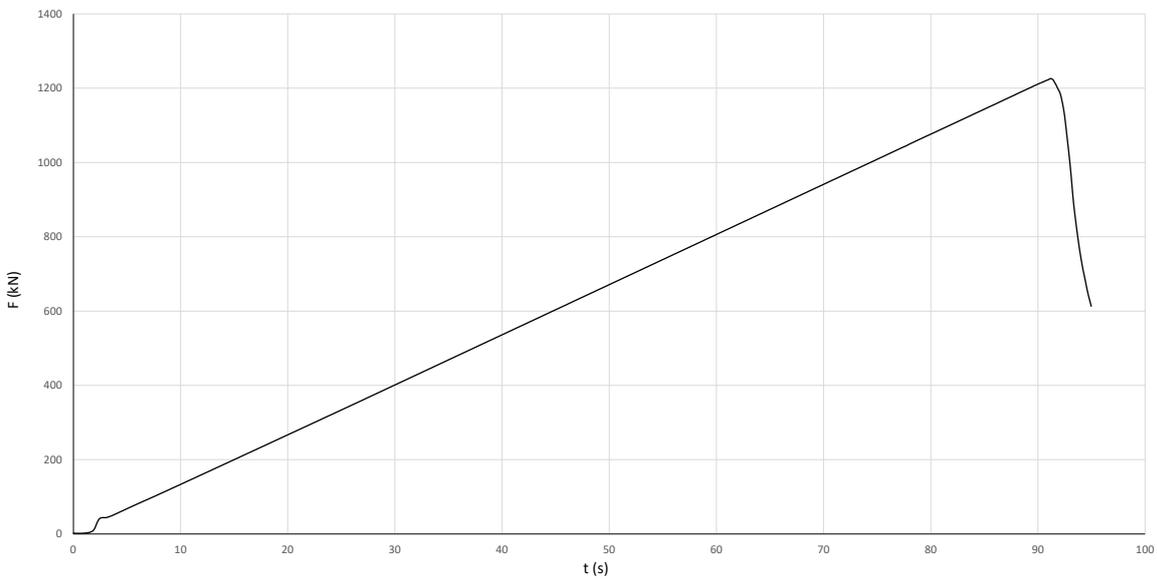


Imagen 62. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 61A.
t: 91,19''; F máxima: 1225,82kN, σ máxima: 54,48MPa.

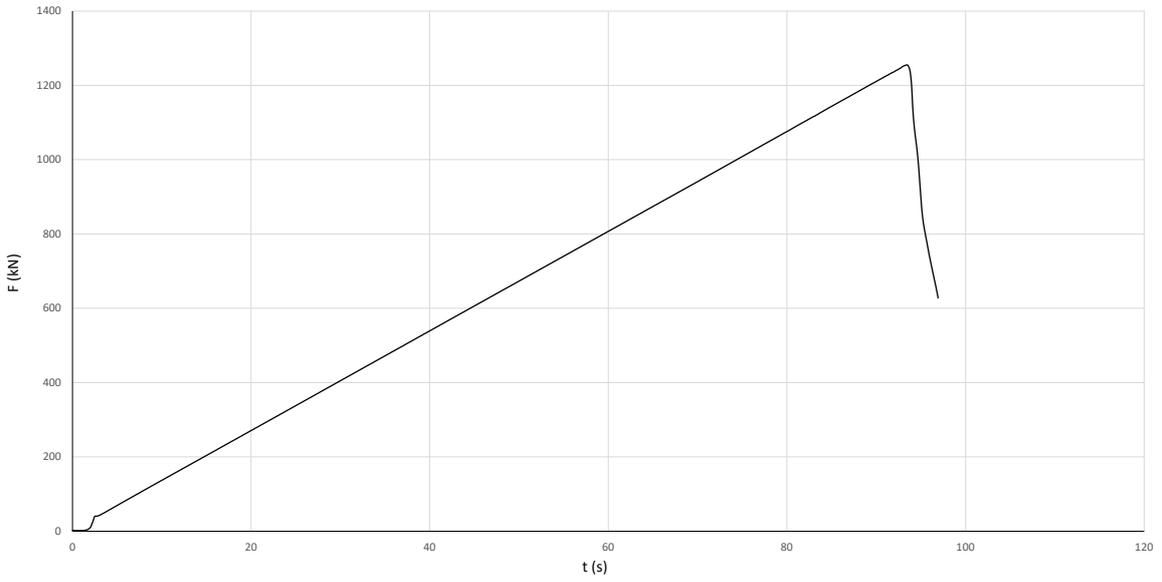


Imagen 63. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 71A.
t: 93,46''; F máxima: 1255,10kN, σ máxima: 55,78MPa.

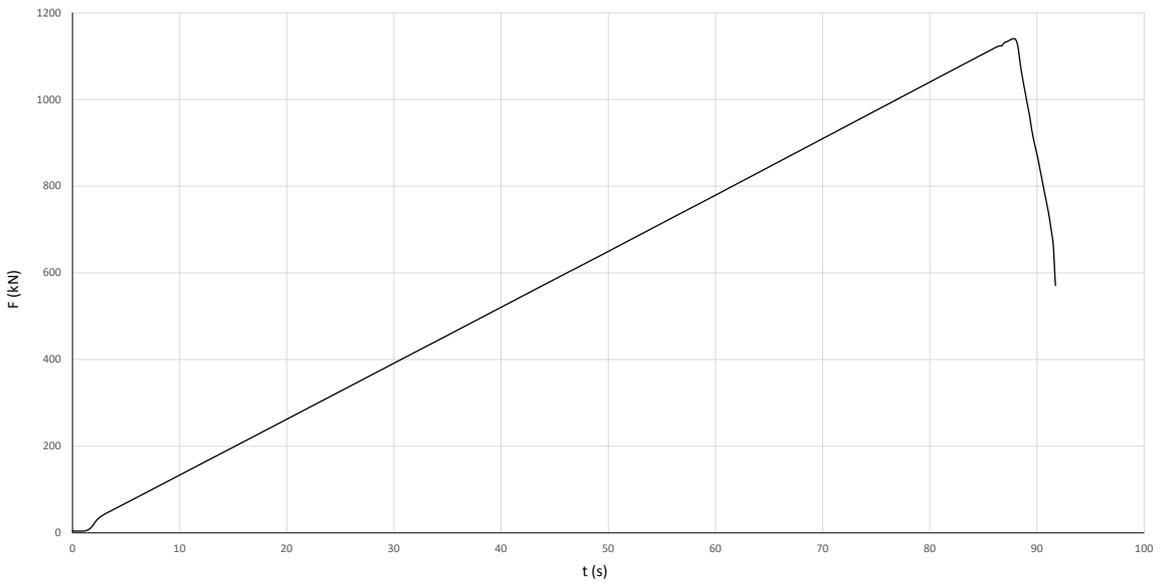


Imagen 64. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 81A.
t: 87,88''; F máxima: 1140,36kN, σ máxima: 52,43MPa.

CAPITULO 6. CONCLUSIÓN.

Con los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados, se plantean las siguientes conclusiones referidas a las pruebas mecánicas realizadas a los dos tipos de hormigón y se analiza el efecto de la fibra de poliolefina a partir de las gráficas de ensayo.

Las conclusiones se basan en ensayos mecánicos obtenidos a una edad de 28 días de media en cámara de curado. La dispersión de resultados con una diferencia de un día es prácticamente inapreciable, por lo que se pueden sacar conclusiones razonables:

- **El uso de aditivos superplastificantes permite conseguir una mejor trabajabilidad del hormigón en estado fresco**, evitando la aparición de los conocidos “erizos” y aportando mayor fluidez a la mezcla.

HORMIGÓN CON FIBRA DE VIDRIO

- El uso de la fibra de vidrio en elementos de hormigón fibroreforzado supone un incremento en su resistencia a **flexión**, mientras que su resistencia a compresión no varía mucho respecto al hormigón sin fibras. Se puede concluir que las fibras de vidrio son más **efectivas a flexotracción**.

HORMIGÓN CON FIBRA DE POLIOLEFINA

- El uso de la fibra de poliolefina en elementos de hormigón fibroreforzado supone un incremento evidente de su resistencia a compresión, siendo **efectivas a compresión hasta una cierta dosificación (5kg/m³)**, llegando a un punto máximo de mejora en tensión del 11,8%. A partir de esta cantidad de fibra se reduce la resistencia a compresión, por lo que es necesario administrar correctamente la fibra para aprovechar al máximo las ventajas que aporta.

- Se aprecia especialmente útil el uso de las fibras de poliolefina en tracción en **comportamiento post-fisura** donde **puede seguir absorbiendo carga aportando mayor ductilidad al hormigón** (véase imágenes 65 y 67).

Observando las tablas de fuerza-desplazamiento de los hormigones reforzados con fibras de poliolefina apreciar un efecto interesante:

- En las dosificaciones nº 5-6 (1-3kg/m³) se ve que la resistencia a flexión se reduce comparandola con el hormigón sin fibras (hormigón patrón 2). No hay ningún fenómeno de recuperación tensional.

- En las dosificaciones nº 7-8 (5-7kg/m³), superando incluso el límite recomendado por el fabricante (5kg/m³) se aprecia claramente una resistencia remanente en la rama de descarga tras la fisuración. Esto tiene un significado muy importante en el hormigón: implica un control de la velocidad de fisuración post-rotura.

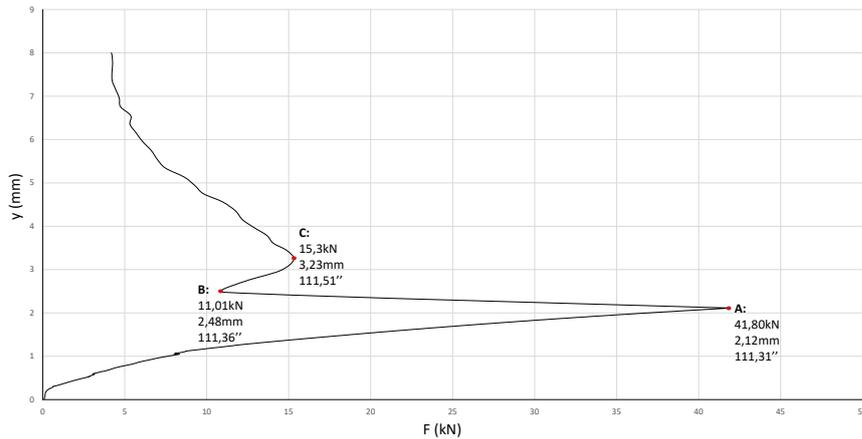


Imagen 65. Efecto de la fibra de poliolefina en la probeta 71A.
 Imagen 66. Visualización del efecto de la fibra.

En dosificaciones de **5kg de fibra/m³** de hormigón, se aprecia un **efecto evidente de recuperación de tensiones debido al cosido de las fibras**. Como se puede ver, se recupera una tensión de 4,29kN tras la rotura, alcanzando un máximo relativo de 15,3kN (un 36,6% de su resistencia máxima).

Con esta dosificación se recupera el **10,26% de su resistencia máxima** a una velocidad media de **5mm/s**.

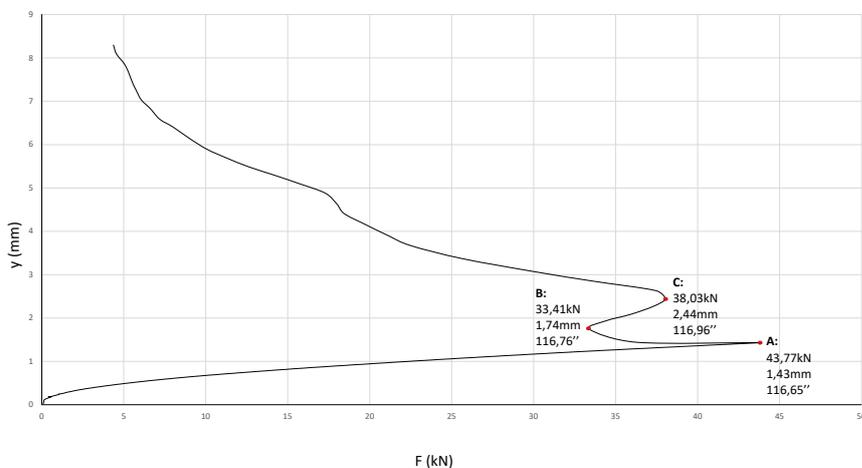


Imagen 67. Efecto de la fibra de poliolefina en la probeta 81A.
 Imagen 68. Visualización del efecto de la fibra.

En dosificaciones de **7kg de fibra/m³** de hormigón, se aprecia todavía un **mayor efecto de recuperación de tensiones debido al cosido de las fibras ("puenteo")**. Como se puede ver se recupera una tensión de 4,62kN tras la rotura, alcanzando un máximo relativo de 38,03kN (cerca de un 87% de su resistencia máxima).

También se puede observar que la **caída de resistencia post-fisura es tres veces menor en esta dosificación (23,7%) que en la anterior (73,7%)**.

Con esta dosificación se recupera el **10,56% de su resistencia máxima** a una velocidad media de **3,5mm/s**.

Dosificación nº	Fuerza máx.	Recuperación	Máximo relativo	% de recuperación
5	52,43	0	-	0%
6	51,15	0	-	0%
7	41,8	4,29	15,3 (36,6%)	10,26%
8*	43,77	4,62	38,03 (87%)	10,56%

Tabla 21. Resumen del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de poliolefina en distintas dosificaciones.

*Dosificación de 7kg/m³. Sobrepasa lo recomendado por el fabricante.

Tras analizar las graficas de ensayo se observa que las dosificaciones con fibra de poliolefina resisten menos a flexión cuanto mayor es el número de fibras en la matriz del hormigón, pero se hay mejores resultados en las dos últimas dosificaciones en el comportamiento post-fisura. Practicamente **se duplica la resistencia al utilizar dosificaciones altas usando macrofibras, puesto que se recupera un 87% usando 7kg/m³ frente a un 36,6% usando 5kg/m³.**

Si se compara el comportamiento mecánico de ambas fibras y se utilizan para reforzar un mismo elemento de hormigón en masa se podría decir que es un poco más útil la fibra de vidrio al aumentar la resistencia a flexión, debido a que la gran mayoría de los elementos en construcción trabajan a flexo-tracción. De todas formas, para conseguir mejores resultados mecánicos lo más interesante sería **combinar ambas fibras en la matriz del hormigón.**

CAPITULO 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

A continuación algunas propuestas para futuras líneas de investigación en relación con el estudio desarrollado en este trabajo de fin de grado:

- 1.** Ampliar el estudio del comportamiento mecánico a flexión del hormigón reforzado con micro-fibra de vidrio AR realizando más dosificaciones y en diferentes circunstancias, como en ambiente de polución industrial en cámara de gases corrosivos.
- 2.** Realizar un estudio más completo utilizando fibras de poliolefina de 12mm y fibras de vidrio de 65mm para poder realizar una comparación y concluir con una longitud ideal para reforzar hormigones.
- 3.** Estudio experimental a largo plazo del fenómeno de cosido post-fisura en hormigones reforzado con macro-fibra de poliolefina en diferentes dosificaciones por encima de lo recomendado.
- 4.** La efectividad de la adherencia de las fibras de poliolefina a diferente temperatura, humedad y tiempo de curado.
- 5.** Comparación de la fibra de poliolefina con otras fibras para su uso en hormigón. Especialmente que aporten una mejora significativa a largo plazo en el efecto post-fisura.
- 6.** Analizar el comportamiento del hormigón reforzado sometido a ensayos no destructivos.

CAPITULO 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] AENOR (2008) Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad. 14889-2. Madrid: AENOR.
- [2] AENOR (2015) Fibras para hormigón. Fibras de vidrio resistentes a los álcalis (AR) Definiciones, clasificación y especificaciones. 83516. Madrid: AENOR.
- [3] BARROS LLERENA, A., CABALLERO, J. M., & ZALDO, V. (1981). *Aplicaciones del cemento reforzado con fibra de vidrio (GRC)*. Informes De La Construcción, 33(333-334-335-336), 73–81. <<https://bit.ly/2SkQhJZ>> [Consulta: 02/04/2021]
- [4] BERTAMINI, L.; POTARIN, L. M.; CALDARA, M. Y MALLONE, W. C. (2008) *Fibras sintéticas a base de poliolefina y proceso para su fabricación*. (España: 1446518) Oficina Española de Patentes y Marcas. <<https://bit.ly/3d1wJRQ>> [Consulta: 13/05/2021]
- [5] BOE (2008) Instrucción de hormigón estructural (EHE-08) 14167. Madrid: BOE.
- [6] CASTELLANOS CASTELLÓN, R. (2018) *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de poliolefina bajo la acción de temperatura elevada*. Trabajo de Fin de Máster. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] CERÁMICAUPC. “Fabricación de la fibra de vidrio”. Youtube. <<https://youtu.be/WtLtOfd8Nxo>> [Consulta: 07/04/2021]
- [8] CHEN CHENG, A. (2013) *Características mecánicas de hormigones reforzados con fibras a edades muy tempranas*. Trabajo de investigación CST/MIH-0X. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [9] CHULIÁ SEQUÍ, V.; GARRIDO BENACHES, F. (2013) *Estudio del HACRF-P sometido a esfuerzo de flexión*. Proyecto fin de carrera. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [10] DEL ÁGUILA, A. *Paneles de fachada prefabricados de G.R.C*. Madrid: ETSAM.
- [11] Fibra de vidrio AR V-12 AM. FIBRATEC.
- [12] Fibra de vidrio tipo E. Propiedades. CALVOSEALING.
- [13] “Hormigón con la incorporación de fibras” Rodríguez López, Fernando; Prado Perez-Seoane, Diego (1984) en Revista de Obras Públicas. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (España), págs. 779 a 796 (1984)
- [14] I.W., TREVOR. *Historia de la tecnología. Desde 1900 hasta 1950 (I)*. Madrid: Siglo XXI de España Editores, S. A. [<https://bit.ly/35G8zsa>]
- [15] MAPEFIBRE MB 65. Fibra estructural de poliolefina para hormigones de alta ductilidad. MAPEI.
- [16] Mariano. *Tecnología de los Plásticos. Fibra de vidrio*. [<https://bit.ly/3d3shlG>]
- [17] Mariano. *Tecnología de los Plásticos. Fibras poliméricas*. [<https://bit.ly/3xOEbYB>]
- [18] MIRAVETE, A. *Los nuevos materiales en la construcción*. Zaragoza: Editorial Reverté, S.A. [<https://bit.ly/3qi8Hre>]

- [19] MORALES ORTUÑO, S. A. (2008) *Fibra de vidrio, pruebas y aplicaciones*. Tesis. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- [20] NARANJO PAREDES, J. A. (2016) *Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos en la edificación: hormigón reforzado con fibra de vidrio*. TESIS. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [21] NAUDÍN LÓPEZ, A. (2014) *Mecanismos resistentes del hormigón reforzado con fibras en su comportamiento frente al spalling*. Tesina Fin de Máster. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [22] OUEDRAOGO GUAYASAMIN, I. S.; ZAPATA MERA, J. O. (2014) *Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de vidrio e influencia del porcentaje de fibra adicionado*. Tesis. Quito: Universidad Católica del Ecuador.
- [23] PALENZUELA TEJERO, A. (2015) *Las poliolefinas en la industria actual: del petróleo a los plásticos*. Proyecto Fin de Grado. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- [24] QUISPE ALEXANDER, H. (2015) *Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de vidrio*. Tesis. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- [25] RODRÍGUEZ LOZANO, J. J.; SEGURA VICENT, E. (2013) *Análisis comparativo del efecto de los distintos tipos de fibras en el comportamiento post fisura del hormigón reforzado con fibras*. Proyecto final de grado. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [26] SIKA (2018) Sika ViscoCrete-6003 NG. Superplastificante de nueva generación para la fabricación de hormigones preparados.

CAPITULO 9. AGRADECIMIENTOS.

Debo agradecer de manera especial y sincera a Dr. Rafel Calabuig Pastor y al Técnico Superior de Laboratorio José Rafael Molina Nieto. Ambos han sido una parte fundamental del trabajo ayudándome y guiándome en los análisis de las muestras y en la confección de los hormigones. Me han permitido adquirir conocimientos prácticos en la elaboración de muestras.

Agradezco también al laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Edificación y al laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura por darme las herramientas y maquinarias necesarias para la correcta realización de la parte práctica de este trabajo.

A las empresas que me han facilitado el material: EBD, SL. y su marca FIBRATEC por el suministro de las fibras de vidrio, y a MAPEI® por las fibras de poliolefina. Sin su ayuda este trabajo posiblemente hubiera tratado de otro tema distinto.

A mi tutor, D. José María Vercher Sanchís por darme confianza y ayudarme en la toma de decisiones durante el desarrollo del trabajo.

Y por último a mis más cercanos, a mi familia, amigos y amigas que me han dado el apoyo suficiente para seguir adelante a pesar de todas las complicaciones.

II. ANEXOS.

ANEXO 1. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).

En primer lugar, el trabajo que estoy realizando consiste en analizar el comportamiento del hormigón reforzado con dos tipos de fibras. El objetivo es comparar su efecto en este material para su uso posterior en la construcción.

Las fibras que se han utilizado son fibras artificiales: de vidrio (FV) y de polipropileno (PP). En la fibra de PP se ha observado que la fisuración queda controlada cuando se alcanza el estado límite de rotura, consiguiendo reducir la exposición del hormigón a los agentes atmosféricos.

OBJETIVO 4 “EDUCACIÓN DE CALIDAD”

Este trabajo supone un punto de partida para adquirir conocimientos teóricos y, sobre todo, prácticos en términos de construcción, como es la fabricación, tipos, empleo y efectos que tiene el uso de las fibras. Se sensibiliza con algunos Objetivos citados en este documento, por lo que fomenta el desarrollo sostenible.

OBJETIVO 8 “TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO”

Las investigaciones sobre las fibras han descubierto avances en la construcción de soleras y revestimientos: se pueden sustituir las armaduras de refuerzo usando fibras. Se consigue prácticamente el mismo efecto y abarata costes en su producción, ayudando al crecimiento económico.

OBJETIVO 9 “INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS”

Se aporta una solución duradera para los desafíos medioambientales, puesto que el uso de esta fibra predispone a alargar la vida útil del hormigón, haciéndolo más eficiente.

OBJETIVO 11 “CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES”

Se ayuda a conseguir la meta nº11, haciendo los edificios más resilientes en el tiempo y usando materiales locales. La industrialización permite conseguir un material con mayor control de calidad en menos tiempo. Ambas fibras se pueden conformar y sintetizar en España con materia prima local (vidrio, arena de sílice; polipropileno, síntesis a partir del etileno) y lo hacen más resiliente al mejorar sus propiedades mecánicas.

OBJETIVO 12 “PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES”

La incorporación de estas fibras no requiere aumentar la relación agua/cemento (A/C) de la matriz del hormigón. El agua es un bien escaso, se sabe que menos del 3% del agua del mundo es fresca, por lo que se sensibiliza evitando gastar más agua de la necesaria.

OBJETIVO 15 “VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES”

Las fibras naturales toman la materia prima de la naturaleza, en cambio, para fabricar fibras artificiales no hace falta destruir parte de las plantas, como se usa en las fibras vegetales. Con esto se fomenta el mantenimiento de los hábitats naturales en su plenitud, la conservación de los bosques, y se trata de evitar la posible pérdida de especies amenazadas para usarlas como material en la construcción.

ANEXO 2. INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Composición química de las fibras de primera y segunda generación. ^[20]	17
Tabla 2. Índices de fluidez del polipropileno. ^[23]	22
Tabla 3. Tamaños de fibra según molde. (Elaboración propia).	26
Tabla 4. Propiedades de la fibra de vidrio utilizada. (Elaboración propia).	28
Tabla 5. Propiedades de la fibra de poliolefina utilizada. (Elaboración propia).	29
Tabla 6. Identificación de probetas de cada hormigón patrón. (Elaboración propia).	30
Tabla 7. Identificación de probetas del hormigón reforzado con fibras de vidrio. (Elaboración propia).	30
Tabla 8. Identificación de probetas del hormigón reforzado con fibras de poliolefina. (Elaboración propia).	31
Tabla 9. Diseño del hormigón patrón para la fibra de poliolefina. (Elaboración propia).	32
Tabla 10. Diseño del hormigón patrón para la fibra e vidrio. (Elaboración propia).	32
Tabla 11. Resultado de ensayos de la dosificación nº1: hormigón patrón 1.	51
Tabla 12. Resultado de ensayos de la dosificación nº2: hormigón patrón 2.	51
Tabla 13. Resultado de ensayos de la dosificación nº3.	52
Tabla 14. Resultado de ensayos de la dosificación nº4.	52
Tabla 15. Resultado de ensayos de la dosificación nº5.	52
Tabla 16. Resultado de ensayos de la dosificación nº6.	52
Tabla 17. Resultado de ensayos de la dosificación nº7.	53
Tabla 18. Resultado de ensayos de la dosificación nº8.	53
Tabla 19. Tensiones medias y recorridos relativos de todas las probetas.	54
Tabla 20. Tensiones para discusión.	55
Tabla 21. Resumen del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de poliolefina en distintas dosificaciones.	64

ANEXO 3. INDICE DE IMÁGENES.

Imagen 1. Esquema de absorción de esfuerzos en el hormigón armado. Armadura trabajando a tracción mientras que el hormigón absorbe compresiones. (Elaboración propia).	7
Imagen 2. Curva de tensión-deformación en el ensayo a flexión. ^[7]	14
Imagen 3. Método de fundición directa. ^[16]	14
Imagen 4. Método de fundición indirecta. ^[16]	14
Imagen 5. Salida del vidrio fundido. ^[16]	14
Imagen 6. Boquillas de salida. ^[16]	14
Imagen 7. Aletas de enfriamiento. ^[16]	14
Imagen 8. Tipos de fibra según su forma. ^[22]	15
Imagen 9. Probeta de muestra del hormigón reforzado con fibra de poliolefina. (Elaboración propia).	24
Imagen 10. Arena fina del laboratorio.	26
Imagen 11. Grava del laboratorio.	26
Imagen 12. Aditivo superplastificante.	27
Imagen 13. Fibra de vidrio.	28
Imagen 14. Fibra de poliolefina (polipropileno).	29
Imagen 15. Amasadora de tambor móvil.	33
Imagen 16. Secado de arena en estufa.	33
Imagen 17. Materiales pesados y preparados.	34
Imagen 18. Cemento con arena en la amasadora.	35
Imagen 19. Mezcla de hormigón antes de añadirle la fibra.	35
Imagen 20. Añadiendo las fibras de poliolefina.	35
Imagen 21. Añadiendo las fibras de vidrio.	36
Imagen 22. Cono de Abram's.	36
Imagen 23. Llenado de la primera capa del cono de Abram's.	37
Imagen 24. Retirada del cono.	37
Imagen 25. Asiento de la masa.	37
Imagen 26. Medida del asiento (h=22cm).	38
Imagen 27. Moldes prismáticos de 4L.	39
Imagen 28. Moldes prismáticos de 13,5L.	39
Imagen 29. Hormigón vertido en los moldes para las probetas de hormigón patrón 1 (11A, 11B)	40
Imagen 30. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 31A, 31B y 31C.	40
Imagen 31. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 61A y 61B.	41
Imagen 32. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 62A y 62B.	41
Imagen 33. Hormigón vertido en los moldes para las probetas 63A y 63B.	41
Imagen 34. Máquina para el ensayo a flexión. (2007).	42
Imagen 35. Máquina para el ensayo de compresión. (1998).	42
Imagen 36. Posición de la probeta de 4L. (Elaboración propia basado en UNE EN 1170-5)	43
Imagen 37. Posición de la probeta de 13,5L. (Elaboración propia basado en UNE EN 1170-5)	43
Imagen 38. Ensayo de flexión. Probeta en carga. (41B)	44
Imagen 39. Ensayo de flexión Probeta en rotura. (41B)	44
Imagen 40. Ensayo de flexión. Probeta en carga. (52A)	45
Imagen 41. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (52A)	45
Imagen 42. Ensayo de flexión. Probeta en carga. (72B)	46
Imagen 43. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (72B)	46
Imagen 44. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (81B)	47
Imagen 45. Ensayo de flexión. Probeta en rotura. (81B)	47
Imagen 46. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (11C, izq.)	48
Imagen 47. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (11C, izq.)	48
Imagen 48. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (11C, izq., vista de perfil)	49
Imagen 49. Ensayo de compresión. Probeta en rotura. (51A, izq.)	49

Imagen 50. Ensayo de compresión. Probeta en rotura (61A, izq.)	49
Imagen 51. Ensayo de compresión. Probeta en rotura (71A, izq.)	50
Imagen 52. Ensayo de compresión. Probeta en rotura (81A, izq.)	50
Imagen 53. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 11A.	57
Imagen 54. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 31A.	57
Imagen 55. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 41A.	58
Imagen 56. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 21A.	58
Imagen 57. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 51A.	59
Imagen 58. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 61A.	59
Imagen 59. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 71A.	60
Imagen 60. Curvas fuerza-desplazamiento. Probeta 81A.	60
Imagen 61. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 51A.	61
Imagen 62. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 61A.	61
Imagen 63. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 71A.	62
Imagen 64. Curvas fuerza-tiempo. Probeta 81A.	62
Imagen 65. Efecto de la fibra de poliolefina en la probeta 71A.	64
Imagen 66. Visualización del efecto de la fibra.	64
Imagen 67. Efecto de la fibra de poliolefina en la probeta 81A.	64
Imagen 68. Visualización del efecto de la fibra.	64