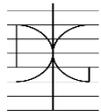


**ESTUDIO TÉCNICO EXPERIMENTAL DE HORMIGONES CON FIBRAS DE POLIPROPILENO,
FIBRAS METÁLICAS Y ÁRIDOS RECICLADOS PARA SU UTILIZACIÓN EN PAVIMENTOS DE BAJA
INTENSIDAD DE TRÁFICO**

Por:
Fernando José Diego Jovells

Agosto 2016

Autor/Author: Fernando José Diego Jovells		Fecha/Date: Agosto de 2015	
Título/Title: Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico			
Directores del trabajo/Supervisors: Dr. Pedro Serna Ros		Código/Code:	Nº páginas/Pages: 132
Departamento/ Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad/University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave/Keywords: Hormigón con fibras de acero, Hormigón con fibras de polipropileno, Áridos reciclados, Paneles redondos, Pavimentos			
Código Unesco: 330505			

AGRADECIMIENTOS

A mi director, el Dr. Pedro Serna Ros por su orientación, consejo y paciencia durante el desarrollo de este estudio.

A los profesores y personal administrativo del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Valencia y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH.

A los técnicos del Laboratorio de Hormigón Paco y Jürgen, por su ayuda durante todo el proceso de ensayos, sus consejos y su paciencia.

A mis compañeros del máster, en especial a Itziar Carné y Marta Roig, por sus consejos, ayuda y apoyo, ya que sin ellas hubiese sido mucho más complicado el proceso.

A mis padres por hacer posible que haya estudiado y por todo el apoyo y los ánimos que me han dado en los malos momentos, ya que sin su ayuda no podría haber realizado ésta tesis.

A mi compañera en la vida, Teresa. Por sus ánimos, paciencia y comprensión que ha tenido conmigo durante la realización de este estudio.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	6
1.1.	Antecedentes	6
1.2.	Objetivos específicos.....	6
1.3.	Estructura del documento.....	7
2.	ESTADO DEL ARTE	8
2.1.	El hormigón reforzado con fibras.....	8
2.1.1.	Definición	8
2.1.2.	Tipos de fibras	8
2.1.3.	Componentes del hormigón reforzado con fibras	10
2.1.4.	Características mecánicas del hormigón reforzado con fibras	16
2.1.5.	Durabilidad del hormigón reforzado con fibras	20
2.1.6.	Ventajas del hormigón reforzado con fibras.....	21
2.2.	Hormigón con áridos reciclados.....	21
2.2.1.	Definición	21
2.2.2.	Antecedentes	21
2.3.	Hormigones para pavimentos.....	23
2.3.1.	Elementos de grandes dimensiones	23
2.3.2.	Ensayo de Round Panel	24
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA	28
3.1.	Desarrollo del programa experimental.....	28
3.1.1.	Planteamiento	28
3.1.2.	Variables.....	28
3.1.3.	Fases del estudio	29
3.2.	Materiales a utilizar.....	31
3.2.1.	Cemento	31
3.2.2.	Agua.....	31
3.2.3.	Áridos	32
3.2.4.	Fibras	35
3.2.5.	Aditivo	37
3.3.	Dosificación	37
3.4.	Metodología	38
3.4.1.	Fabricación del hormigón.....	38
3.4.2.	Fabricación de probetas.....	40

3.4.3.	Ensayos de caracterización	41
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
4.1.	Ensayo de consistencia del hormigón en estado fresco por cono de Abrams.....	47
4.2.	Ensayo de resistencia a compresión simple en probetas cilíndricas según UNE-EN 12390-3:2009	49
4.3.	Ensayo de resistencia a flexotracción a tres puntos en probetas prismáticas según UNE-EN 14651.....	52
4.4.	Ensayo de resistencia a flexotracción con Round Panel según ASTM C 1550-08	67
5.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	75
5.1.	Conclusiones.....	75
5.2.	Futuras líneas de investigación	76
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	78
7.	ANEXO	82
7.1.	Fichas técnicas del vendedor de fibras de acero empleadas	82
7.2.	Fichas técnicas del vendedor de fibras de polipropileno empleadas	84
7.3.	Gráficas obtenidas en el ensayo de flexotracción a tres puntos según UNE - EN - 14651: 2007 + A1	85
7.4.	Fotografías de probetas prismáticas ensayadas a flexotracción	110
7.4.1.	Probetas con FP-5kg	110
7.4.2.	Probetas con AR-FP-5KG	111
7.4.3.	Probetas con FP-10kg.....	111
7.4.4.	Probetas con AR-FP10KG	112
7.4.5.	Probetas con FM-45/50.....	113
7.4.6.	Probetas con AR-FM-45/50.....	114
7.4.7.	Probetas con FM-65/60.....	115
7.4.8.	Probetas con AR-FM-65/60.....	116
7.5.	Gráficas obtenidas en el ensayo de paneles redondos según ASTM C 1550-08.....	117
7.5.1.	Round Panel FP- 5 kg.....	117
7.5.2.	Round panel con FP-10kg.....	119
7.5.3.	Round panel con FM-45/50.....	121
7.5.4.	Round panel con FM-65/60.....	123
7.5.5.	Round panel con AR-FP-5kg	125
7.5.6.	Round panel con AR-FP-10kg	126
7.5.7.	Round panel con FM-45/50.....	128
7.5.8.	Round panel con FM-65/60.....	130
7.5.9.	Round panel con HC	131

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Actualmente, el hormigón es uno de los materiales de construcción más empleados tanto para funciones estructurales como para funciones no estructurales. La versatilidad del mismo, unido a su bajo coste respecto a otros materiales, le ha otorgado este estatus.

Una de las características más importantes del hormigón es la de poder adaptarse a casi cualquier forma, haciéndolo apto para ser usado en construcciones de complejidades diversas. El hormigón ofrece una alta resistencia a esfuerzos de compresión, no obstante, es débil frente a esfuerzos de tracción, resistiéndolos hasta diez veces menos y tiene un modo de rotura frágil. Para combatir estos hándicaps, al hormigón se le añaden refuerzos, comúnmente de acero, los cuales son capaces de absorber estos esfuerzos, convirtiendo al hormigón en un material dúctil. Estos refuerzos, ayudan además a controlar la fisuración del hormigón endurecido, que aparece frente a gradientes de temperatura, retracción o esfuerzos provocados por cargas.

Pese a ser un material con una larga vida y su extenso empleo actual en el edificación y obra civil, el hormigón ha experimentado muy pocos avances. Una de las tendencias más estudiadas en las últimas décadas, es la del empleo de fibras en el hormigón. Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón para conferirle ciertas propiedades específicas. Éstas, al igual que ocurre con las armaduras tradicionales, pueden ser usadas como refuerzo estructural, pero reforzando al hormigón en todas las direcciones. Además, ofrecen otros beneficios como el control de la fisuración y el aumento de la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos a través de la sección fisurada. Asimismo, las fibras disminuyen la retracción por fraguado y aumentan la resistencia a fatiga e impacto. Los pavimentos precisan un material capaz de abarcar grandes extensiones con una ejecución rápida, un buen acabado y que resista desgastes constantes, siendo por tanto el hormigón con fibras, un material óptimo para la fabricación de éstos.

La necesidad de modificar la tradición constructiva para disminuir el impacto sobre el medio ambiente ha incitado a numerosos investigadores a estudiar nuevas técnicas de buena construcción y el empleo de nuevos materiales. Otro de los problemas que presenta la construcción tradicional es la cantidad de residuos y materiales desechables que se generan, así como sucede en otros sectores. Una de las obligaciones de los profesionales de la construcción es por tanto, intentar dar uso a estos desechos y sustituyendo a materiales tradicionales. Numerosos estudios han demostrado que con el empleo de materiales reciclados se pueden conseguir las mismas prestaciones que con materiales vírgenes. El empleo de materiales reciclados reduce la sobreexplotación actual de los recursos del planeta y por tanto el impacto de la construcción en el medio ambiente, favoreciendo una construcción sostenible. Se ha demostrado que se pueden utilizar áridos reciclados procedentes de demoliciones de obras para la sustitución parcial de áridos de forma muy efectiva. No obstante, la industria de la construcción los sigue asociando erróneamente a una disminución de la calidad.

1.2. Objetivos específicos

El objetivo principal del presente proyecto consiste en estudiar la viabilidad de pavimentos de hormigón con fibras de polipropileno y fibras de acero con sustitución parcial de árido grueso por áridos reciclados para tráfico medio. De igual manera, se pretende estudiar los efectos de la

adición de diferentes tipos y cantidades de fibras metálicas y de polipropileno en hormigones para pavimentos y demostrar que el empleo de áridos mixtos reciclados es compatible en hormigones con adición de cualquier tipo de fibras sin disminuir la calidad del conjunto. Para conseguir estos objetivos será necesario:

Estudiar experimentalmente el comportamiento de probetas cilíndricas, prismáticas y paneles redondos, todos ellos normalizados, de hormigón con fibras de polipropileno y metálicas, con sustitución parcial de áridos reciclados.

Analizar el efecto del empleo de los diferentes tipos de fibras empleados en diferentes cantidades en el comportamiento del hormigón empleado.

Demostrar la compatibilidad del empleo de áridos reciclados en el porcentaje de sustitución propuesto.

Analizar la viabilidad de estos hormigones para su posterior uso en el diseño de pavimentos económicamente competitivos y sostenibles en los que se pueda revalorizar una fracción importante de residuos.

1.3. Estructura del documento

Este documento se estructura en 5 capítulos.

El primer capítulo contiene una breve introducción, un apartado sobre los objetivos a alcanzar durante el estudio y éste apartado de estructura del documento.

El segundo capítulo, correspondiente al estado del arte, trata el estado actual en el campo de los hormigones con fibras sintéticas y metálicas, así como de la aplicación de áridos reciclados en el hormigón, presentándose los estudios y avances realizados en esos campos. Asimismo, se tratarán los estudios realizados con paneles redondos y las diferentes variables que existen del mismo.

En el tercer capítulo trata el programa experimental y la metodología. Sirve de herramienta para detallar los pasos a seguir para caracterizar los hormigones con fibras y áridos reciclados a estudiar. En este capítulo se explicarán detalladamente los materiales y métodos empleados, así como la explicación de las diferentes fases del estudio.

En el capítulo cuatro, se exponen los resultados obtenidos durante los ensayos que se han explicado en el tercer capítulo. Asimismo, se realiza una explicación pormenorizada de los mismos y una comparación entre los diferentes tipos de hormigón empleados, de manera que quede demostrado el efecto que produce cada variable al adicionarla en el hormigón.

Por último, en el capítulo cinco, se exponen las conclusiones y se trazan las futuras líneas de investigación, aportando una serie de ideas sobre las posibles mejoras y estudios para la continuación y mejor caracterización de hormigones con fibras y áridos reciclados destinados a pavimentos con intensidad de tráfico media.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. El hormigón reforzado con fibras

Los temas que abarca este estudio han sido estudiados por diversos investigadores con anterioridad, no obstante, nadie ha juntado en un mismo estudio el empleo de fibras diversas y el de áridos reciclados de manera tan específica.

La finalidad de este apartado es revisar el conocimiento que se tiene hasta el momento de los campos tratados, tanto de los materiales en si como de los estudios realizados por otros investigadores hasta la fecha.

2.1.1. Definición

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es aquel que incluye en su matriz fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, cuyo fin es mejorar algunas prestaciones, ya sea en estado fresco, primeras edades o en estado endurecido. [1] (EHE-08). El ACI 544.1R-96 [2] lo define como aquel hormigón compuesto mayoritariamente por cemento hidráulico, agregados y fibras discretas como refuerzo, procedentes de materiales como el acero, vidrio, polímeros orgánicos (fibras sintéticas) o de origen natural (amianto, yute).

Las fibras empezaron a emplearse hace siglos. Inicialmente, se hacía uso de pelo de caballo o paja para reforzar morteros y adobes. Ya en 1898 se desarrolló el sistema hatschek, el cual permitió la fabricación de cemento con fibras de amianto en láminas finas, conocido como fibrocemento. No obstante, más adelante se descubrió que el amianto era nocivo para la salud, por lo que empezó a emplear otros tipos de fibras, tales como metálicas o de vidrio (I. R. Kennedy Greig, 1984) [3].

El HRF es similar al hormigón armado convencional, el cual cose las fisuras que puedan producirse, dejando a la estructura fuera de servicio. No obstante, se sustituyen los refuerzos de pocas barras de gran diámetro, las cuales están posicionadas en direcciones determinadas, por muchas fibras de pequeña longitud y sección, localizadas y orientadas aleatoriamente en el hormigón. Estas fibras resisten los esfuerzos que les transmite el hormigón cuando éste empieza a fisurarse.

Otra de las características más notables de la adición de fibras en el hormigón es la modificación que provocan en el mismo de su comportamiento no lineal. Este fenómeno es especialmente visible en su comportamiento a tracción, ya que pasa de ser un material frágil a un material dúctil. Las fibras influyen además en este sentido, impidiendo la apertura y propagación de fisuras; y aumentando la capacidad de mantener deformaciones sostenidas bajo acciones sin llegar al colapso (aumento de la tenacidad). Esto convierte al HRF en un material muy adecuado frente a acciones dinámicas y frente a situaciones que requieran un alto control de la fisuración.

2.1.2. Tipos de fibras

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores, pero especialmente, de la naturaleza, tipo y características geométricas de las fibras empleadas (Pujadas, 2008) [4]. De esto extraemos diferentes formas de clasificación de las fibras.

Por una parte, las fibras pueden ser clasificadas en tres tipos según su naturaleza:

- Fibras metálicas: Acero
- Fibras naturales: Asbesto, celulosa, carbono, basalto, yute, etc.
- Fibras poliméricas: Nylon, polipropileno, poliácido nitrilo, alcohol de polivinil.

Tabla 1. Tipos de fibras y características (Maccaferri [5])

Fibras	Diámetro (μm)	Densidad (10 ³ kg/m ³)	Modulo elástico (kN/mn ²)	Resistencia a tracción (kN/mn ²)	Elongación a ruptura (%)
Acero	5 - 500	7,84	200	0,5 - 2	0,5 - 3,5
Vidrio	9 - 15	2,60	70 - 80	2-4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,04	3,00	180	3,30	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 7	0,5 - 0,75	8
Nylon	-	1,10	4	0,90	13 - 15
Polietileno	-	0,95	0,30	0,0007	10
Carbono	9	1,90	230	2,60	1
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,60	2,1 - 4
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1	3

Asimismo, estas pueden clasificarse por su función:

- Fibras estructurales: Proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa. Pueden sustituir total o parcialmente a las armaduras en algunas aplicaciones, dada su contribución en los cálculos. [1]
- Fibras no estructurales: Mejoran determinadas propiedades como el control de la fisuración por retracción, el incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros. Este tipo de fibras no se consideran en el cálculo de la sección de hormigón. [1]

En la figura 1 se puede ver una comparación de algunas de las principales fibras estructurales con los refuerzos de acero tradicionales

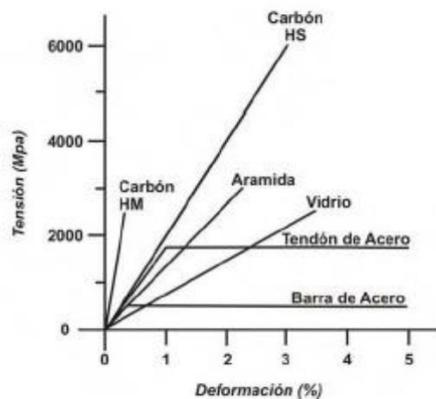


Figura 1. Comparación entre fibras y refuerzos de acero (Byars et al., 2003) [6]

Las fibras también pueden ser clasificadas por su geometría, ya que cada fibra tiene unas características de longitud (l_f), diámetro equivalente (d_f) y esbeltez (λ) [1].

Las fibras a emplear en cada hormigón dependerán del uso que se le vaya a dar al mismo. También influirá el factor económico, la disponibilidad de las fibras y la durabilidad que se busque.

2.1.3. Componentes del hormigón reforzado con fibras

La incorporación de fibras en el hormigón altera sus propiedades tanto en estado endurecido como en estado fresco. En este sentido, el asentamiento puede disminuir entre 25 y 102 mm respecto a un hormigón convencional (ACI 544.1R-96, 2009) [2]. Esto supone que se modifiquen los criterios de dosificación respecto a los hormigones tradicionales.

El volumen de fibras a incorporar y su geometría afectarán principalmente al tamaño máximo del árido, a la relación grava-arena, a la cantidad de aditivos superplastificantes a emplear y a la cantidad de árido fino. En la figura

2.1.3.1. Cemento

En los HRF se puede utilizar cualquier cemento apto para hormigones convencionales. Éste dependerá sobretodo de las características establecidas en el proyecto.

2.1.3.2. Agua

El agua a emplear en HRF tendrá las mismas características exigibles a los hormigones tradicionales armados. No obstante deberá analizarse el contenido de posibles agentes que puedan afectar a las fibras adicionadas, sobretodo en caso de un alto contenido en cloruros que puedan provocar la corrosión de las fibras de acero.

La adición de fibras aumentará la consistencia del hormigón en mayor o menor medida dependiendo de la cantidad y geometría de las mismas, no obstante, este hecho no debe ser compensado con una modificación en la cantidad de agua, sino con la adición de aditivos superplastificantes (EHE-08, Anejo 14) [1]

2.1.3.3. Áridos

Los áridos empleados en la fabricación de HRF deben cumplir con las exigencias requeridas para la fabricación de hormigones tradicionales. No obstante, sí que se requiere un control del tamaño de partícula, granulometría y forma adecuadas.

Se permite el empleo de áridos tanto rodados como machacados, no obstante, es más adecuado el empleo de los primeros, sobretodo en áridos finos, ya que se obtiene una mayor docilidad.

Es aconsejable la incorporación de mayor cantidad de finos para prevenir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y mejorar la movilidad de las fibras. Esto último depende sobretodo de la proporción de árido grueso y del tamaño máximo del árido, ya que cuanto mayores sean, menor será la movilidad potencial de las fibras (Hannant1 1978) [7](Figura 2).

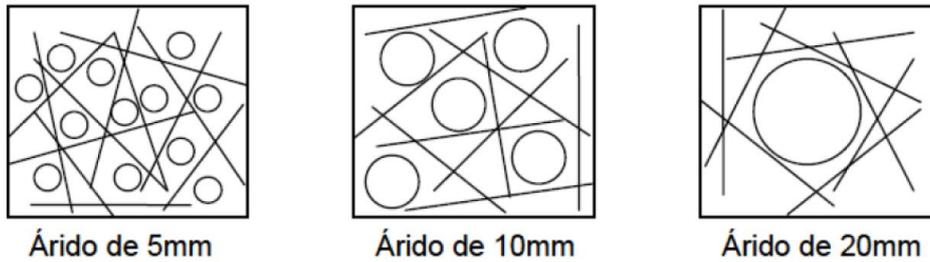


Figura 2. Efectos del tamaño del árido en la distribución de las fibras (Hannant, 1978) [7].

La JSCE (Japan Society of Civil Engineers) establece que el tamaño máximo de árido debe ser inferior a la mitad de la longitud de la fibra (JSCE,1984) [8]. Por otra parte, no se recomienda el empleo de tamaños máximos de árido mayores de 20 mm, aunque algunos estudios han obtenido buenos resultados con el empleo de áridos de hasta 30 mm (ACI 506.1R-08, 2008) [9].

Asimismo, se recomienda que el tamaño máximo del árido no supere:

- $2/3$ de la longitud máxima de la fibra
- $1/5$ del lado del elemento
- $3/4$ de la distancia libre entre las barras de armado.

2.1.3.4. Aditivos

Los aditivos empleados en los HRF suelen ser los reductores de agua o superplastificantes. Esto se debe a que el hormigón sufre una reducción importante de la docilidad cuando se le adicionan fibras de cualquier tipo, sobre todo si éstas se emplean en cantidades elevadas. Para compensar ésta pérdida de docilidad sin afectar a las características es necesario el empleo de aditivos superplastificantes, ya que si se pretendiese incrementar la cantidad de agua de la mezcla, se produciría una disminución de la resistencia y la durabilidad.

No obstante, la adición de superplastificantes en los HRF debe realizarse de forma controlada y sin excederse en la cantidad. Añadir demasiado superplastificante podría suponer un incremento de la fluidez demasiado alto, provocando un apelotonamiento de las fibras (formación de erizos).

Otra clase de aditivos empleada en éste tipo de hormigones son los aditivos aireantes, no obstante, el empleo de los mismos obedece a razones más específicas. Éstos aditivos se emplean cuando los HRF van a estar sometidos a bajas temperaturas con variaciones y, por tanto, a ciclos de hielo/deshielo.

En los HRFA en particular, debe controlarse la cantidad de ion cloruro aportado por los componentes. Según el Anejo 14 de la EHE 2008 [1], cuando las fibras adicionadas sean metálicas, el ion cloruro aportado por los componentes no debe exceder del 0.4% del peso del cemento.

Por último, cuando se van a emplear aditivos en hormigones con fibras, es necesario realizar ensayos previos a la puesta en obra para comprobar la efectividad de los componentes al combinarse, ya que ésta es desconocida (Massicotte, Degrange & Dzeletovic, 2000). [10]

2.1.3.5. Adiciones

Las adiciones utilizadas en los HRF normalmente son de tipo puzolánico. Las más empleadas son las puzolanas naturales, las cenizas volantes y el humo de sílice. Éstas adiciones forman silicatos similares a los que produce el cemento, además dependiendo de la adición, pueden mejorar la impermeabilidad del hormigón, mejorar la cohesión del material (mejora de la adherencia fibra-matriz), aumentar su durabilidad, controlar la retracción, disminuir el riesgo de segregación y reducir el rebote en el caso de los hormigones proyectados. Por tanto, el empleo de adiciones consigue una mejora en general de las características del hormigón. En hormigones proyectados, por ejemplo, una sustitución de humo de sílice entre 7-10 % del peso del cemento puede reducir hasta un 20 % la pérdida de fibras por rebote en hormigones proyectados en seco (Bindiganavile & Banthia, 2000). [11]

2.1.3.6. Fibras de acero

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón durante el amasado para mejorar ciertas propiedades que el hormigón tradicional no posee.

La matriz- fibra de los hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA) es más efectiva y posee una resistencia a tracción y un módulo de elasticidad mucho mayor que el hormigón tradicional, de hecho, la adherencia con la matriz es mayor a su resistencia a tracción (Naaman, 2000) [12]

Las fibras de acero se pueden obtener por diferentes métodos. El más común consiste en fabricarlas por corte de alambre trefilado, de acero, de bajo contenido en carbono.

Las fibras de acero deben ser conformes con la norma UNE 83500-1. Según su proceso de fabricación, la EHE-08 [1] las clasifica en:

- Trefiladas (Tipo I)
- Cortadas en láminas (Tipo II)
- Extraídas por raspado en caliente (Virutas de acero) (Tipo III)
- Fundición Tipo IV

En cuanto a la influencia de la geometría de las fibras, el parámetro más característico es la relación longitud / diámetro equivalente (esbeltez). De este valor depende en gran medida la ductilidad y la tenacidad del hormigón reforzado con fibras. La sección transversal de las fibras depende sobretodo del material empleado en su fabricación. La esbeltez generalmente se encuentra entre 40 y 80 (Naaman, 2000) [12]

En la figura 3 puede apreciarse la relación entre la esbeltez y la energía absorbida.

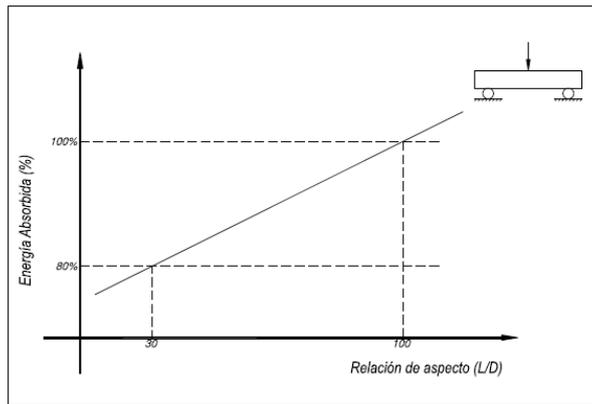


Figura 3. Relación entre esbeltez de fibras y energía absorbida (Maccaferri) [5]

Normalmente, la longitud de la fibra se recomienda que sea como mínimo 2 veces el tamaño del árido mayor. Es normal el empleo de longitudes de 2.5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Además, el diámetro de las tuberías de bombeo exige que la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro del tubo. Sin embargo, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad. Es aquí donde entra otro de los aspectos más importantes de la geometría de las fibras, la forma. Ésta tiene una incidencia clave en la adherencia entre la fibra y el hormigón. Las formas pueden ser muy variadas, como puede apreciarse en la figura 4.

Tipos de fibras según su forma	Esquema
Recta de sección circular	
Recta de sección rectangular	
Ondulada	
Recta con extremos en forma de cono	
Recta con extremos en forma de gancho	
Rectas con extremos chatos	

Figura 4. Tipos de fibras según su forma (Bekaert) [13]

La forma de las fibras afecta directamente a la adherencia entre estas y el hormigón, dificultando el arrancamiento de las mismas, lo cual hace que la resistencia a tracción aumente considerablemente, como puede apreciarse en la figura 5.

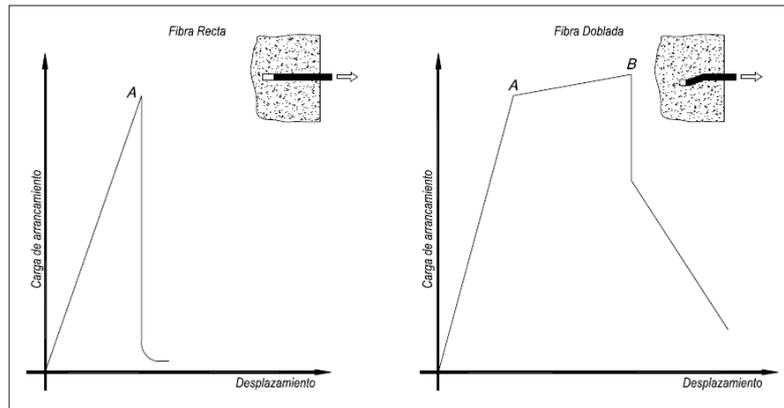


Figura 5. Incremento de la adherencia fibra-hormigón con la forma de la fibra. (Maccaferri) [5]

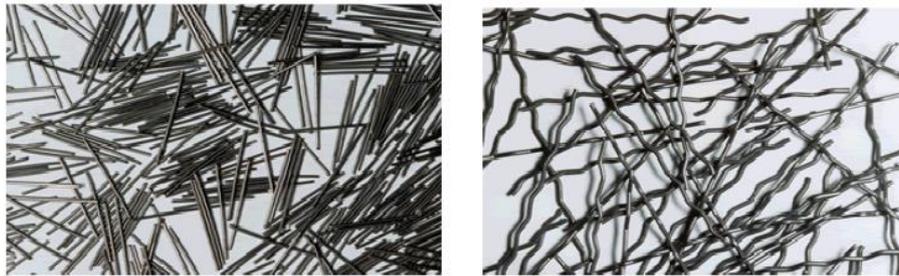


Figura 6. Fibras rectas y fibras onduladas (Tipo I) (Bekaert) [13]



Figura 7. Fibras laminadas (Tipo II) y raspado en caliente (Tipo III) (Bekaert) [13]

El contenido de fibras metálicas en HRFM varía entre 0.25 y 2%, pudiendo encontrarse hormigones con adiciones de hasta 15% de fibras metálicas en algunos casos extraordinarios.

Por otra parte, cuando la cantidad de fibras en el HRFA es baja (entre 20 y 30 Kg/m³) no hace falta realizar ninguna modificación en la dosificación respecto a un hormigón tradicional. No obstante, cuando se aumentan estas cifras es aconsejable realizar ajustes en la misma. (Arango S. 2010). Estos ajustes afectan al tamaño máximo de árido, la relación grava/aren, la cantidad de aditivos reductores de agua y la cantidad de finos.

Tabla 2. Recomendaciones de proporciones para dosificaciones de HRFA (ACI 544.1R-96, 2009) [2]

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido (mm)		
	10	20	40
Cemento (kg/m ³)	350-600	300-530	280-415
Agua/cemento	0.35-0.45	0.35-0.5	0.35-0.55
% árido fino/grueso	45-60	45-55	40-55
% aire ocluido	4-8	4-6	4-5
Fibras conformadas (V _f %)	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Fibras planas (V _f %)	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

2.1.3.7. Fibras de polipropileno

El empleo de fibras de polipropileno ha ganado mucho interés desde la década de los 90, con el fin de tener una alternativa a las fibras de acero, dada su escasez. Las ventajas de este tipo de fibras frente a las metálicas son su ligereza, su baja conductividad, su gran durabilidad, la inexistencia de interferencias electromagnéticas y la despreocupación frente a problemas como la corrosión. Todo esto, asegurando una alta resistencia y rigidez al conjunto. Este tipo de fibras se dividen en dos grupos según su composición química:

1. Poliolefinas o poliaquenos: Obtenidas por la polimerización de olefina (alqueolos)
2. Poliamidas: Obtenidas por enlaces de Amida

Por otra parte, las fibras de tipo polimérico pueden ser clasificadas según su forma física, de acuerdo a la norma UNE-EN 14889-2 (2008) en los siguientes grupos:

- Clase Ia: Micro fibras : < 0.30 mm de diámetro: Mono – filamentosas
- Clase Ib: Micro fibras : < 0.30 mm de diámetro : Fibrilosas
- Clase II: Macro fibras : > 0.30 mm de diámetro

Las microfibras pueden ser de polipropileno, plástico o nylon. Su función es controlar la formación de fisuras a edades tempranas del hormigón, cuando éste aún se encuentra en estado plástico, además de ayudar a controlar la segregación.

Las macrofibras se utilizan como refuerzo. Éstas mejoran la tenacidad del hormigón, aumentando la capacidad de carga de la matriz tras el agrietamiento.

En este estudio emplearemos fibras de polipropileno, por lo que nos centraremos en sus características. El polipropileno es un polímero sintético que proviene de los hidrocarburos, es un material inerte que no reacciona con el hormigón. Además, como ventaja frente al metal, éste no se oxida ni cambia sus propiedades con el tiempo. Según las características geométricas de las fibras de polipropileno y su cantidad, éstas afectarán al hormigón de formas distintas.

Las fibras de polipropileno disminuyen la trabajabilidad del hormigón en estado fresco. Esto se debe en parte, a que incrementan el aire ocluido en la mezcla, de forma que dificulta su compactabilidad. Este efecto aumenta proporcionalmente al incremento de la cantidad de fibras adicionadas. Esto hace necesario el empleo de superplastificantes, de manera que se compense la disminución de trabajabilidad sin aumentar la cantidad de agua dosificada. No obstante, algunos estudios han demostrado que el empleo de ceniza volante cuando se adicionan fibras de polipropileno, elimina los problemas de trabajabilidad y segregación que éstas suelen provocar. (Gencil M, and Ozel B. 2011) [14].

El empleo de fibras de polipropileno ayuda a controlar la aparición de fisuras por retracción plástica y por contracciones térmicas del hormigón a edades tempranas.

Teniendo en cuenta la geometría de las fibras de polipropileno, ha sido demostrado en algunos estudios que el empleo de fibras de polipropileno fibriladas de 12mm de longitud, hace que la resistencia a compresión del hormigón aumente ligeramente. Por otra parte, el empleo de fibras de 19mm produce un ligero aumento de la tenacidad (Bayasi Z, and Zeng J. No 6, Diciembre de 1993), [15] siendo este aumento muy significativo con el empleo de fibras de polipropileno monofilamentado de 50 mm, empleado en otras investigaciones. [16]

En estado endurecido, el hormigón con fibras de polipropileno posee un mejor comportamiento a flexión, en función a la cantidad de fibras adicionadas y su tipo. Un factor muy importante en esta mejora es la dispersión de las fibras, el anclaje de estas con la matriz y la colocación de las mismas dentro del hormigón.

El empleo de fibras de polipropileno consigue una mejor distribución de los esfuerzos en el hormigón, produciendo una mejor redistribución de las fisuras y aumentando la ductilidad del elemento.

2.1.4. Características mecánicas del hormigón reforzado con fibras

El comportamiento del HRF varía en función al contenido y tipo de fibras. La principal diferencia entre las fibras de acero y las de polipropileno es que las primeras tienen un módulo de deformación muy superior a las de polipropileno. Las de acero tienen un módulo de deformación de 210000 MPa, mientras que las fibras de polipropileno tienen entre 3000 y 10000 MPa. Esto supone que las fibras sintéticas se deforman más que las de acero y por tanto, alcanzan la rotura más fácilmente. Asimismo, a tracción, las fibras de acero soportan 500-2000 MPa, mientras que las de polipropileno 200-600 MPa.

No obstante, las fibras de polipropileno son mucho más livianas que las de acero, ya que su densidad es de 910 Kg/m³ y las de acero tienen una densidad de 7850 Kg/m³.

Dadas las características de las fibras de polipropileno, éstas se dosifican en volúmenes mayores que las fibras de acero y, por tanto, lo que supone una reducción adicional de la trabajabilidad.

2.1.4.1. Resistencia a tracción

La adición de fibras en el HRF mejora sensiblemente el comportamiento pre-fisura del hormigón a tracción directa respecto a un hormigón tradicional. Asimismo, el efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón tras el empleo de fibras en el hormigón, es el importante incremento de su resistencia residual a tracción post-fisura, debido al efecto cosido de las mismas entre las caras de las fisuras producidas.

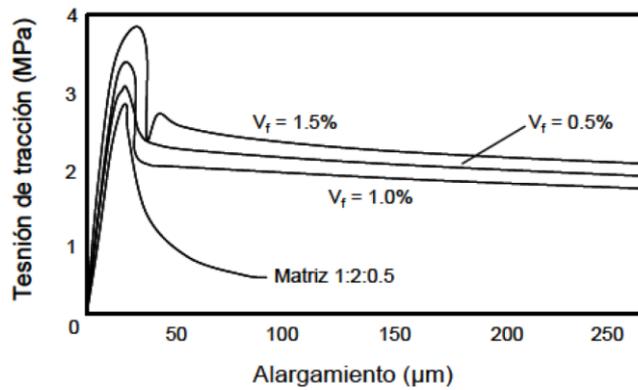


Figura 8. Curvas tensión de tracción-alargamiento de morteros en función del volumen de fibras "vf" a tracción directa [2]

Asimismo, la resistencia a tracción post fisura afecta a otras propiedades mecánicas como la adherencia de armaduras, la resistencia a cortante, la fatiga, etc. (Massicote, 2000). [10]

Una adición de fibras del 1.5% del volumen en hormigones o morteros puede suponer incrementos a tracción directa entre el 30 y el 40% (ACI 544. 1R-96, 2009). [2]

2.1.4.2. Resistencia a compresión

La adición de fibras tanto metálicas como sintéticas no mejora de forma significativa la resistencia a compresión del hormigón. Se pueden dar incrementos poco significativos con porcentajes de fibras elevados (mayores al 1.5% del volumen de hormigón). No obstante, la adición de fibras sí mejora la ductilidad del hormigón. Por otra parte, el módulo elástico y el coeficiente de Poisson no se ven alterados de manera importante para porcentajes de fibras inferiores al 2% del volumen del hormigón (Maccaferri, 2005). [5]

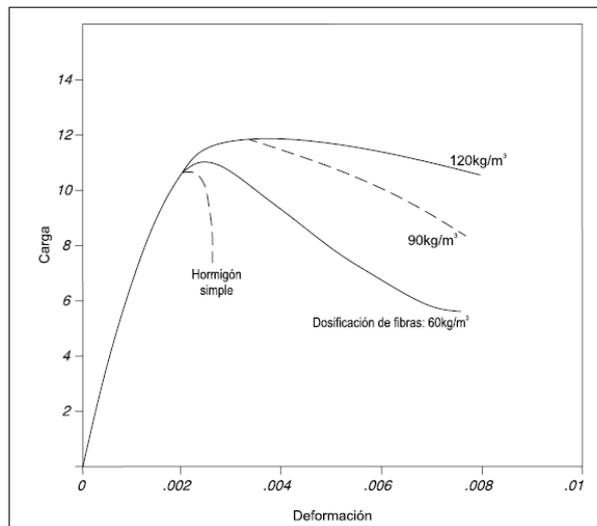


Figura 9. Ejemplo de Gráfica carga-deformación para hormigones con diferentes cuantías de refuerzo con fibras. (Maccaferri 2005) [5]

2.1.4.3. Resistencia a flexotracción

La adición de fibras en el hormigón tanto metálicas como sintéticas, incrementa la resistencia a flexotracción del hormigón de una manera más importante que a compresión o a tracción simple. Éste hecho se debe al comportamiento dúctil que obtiene el hormigón con la adición de fibras en las zonas fisuradas. Esto supone la aparición de resistencias residuales provocadas por las fibras aún después de la aparición de la primera fisura. (Hannant, 1978) [7] (figura10).

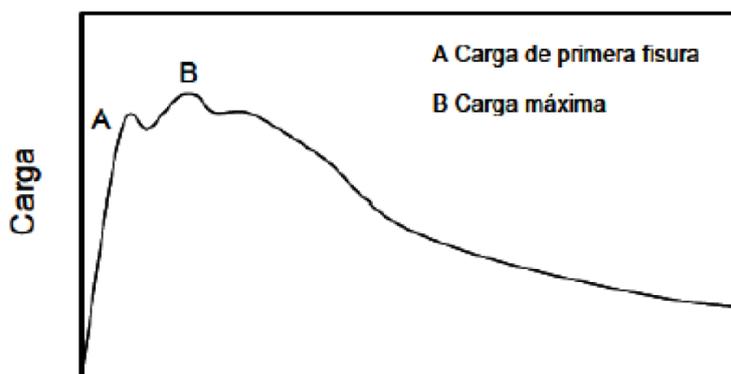


Figura 10. Curva carga-flecha a flexotracción para un HRFA (ACHE, 2000)

El incremento de la resistencia a primera fisura del hormigón por adición de fibras no es significativo, ya que esta propiedad depende básicamente de la matriz de hormigón, no del contenido, tamaño y forma de las fibras. Para mejorar la resistencia a primera fisura es más rentable utilizar, por tanto, aditivos o humo de sílice, por ejemplo. (ACHE, 2000) [17]

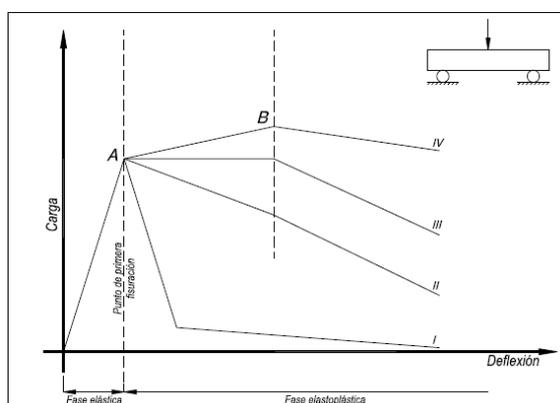


Figura 11. Comportamiento a flexión del hormigón con fibras (Maccaferri) [5]

En la figura 13, se puede observar cómo el hormigón se comporta de forma plástica e independientemente del tipo y la cantidad de fibras hasta la primera fisuración (Punto A). A partir de entonces empiezan a trabajar las fibras, las cuales influirán de forma distinta según la cantidad y el tipo adicionado. La curva I representa el comportamiento de un hormigón sin refuerzo, una vez alcanza la carga de rotura se colapsa, típico de un material de comportamiento frágil. La curva II empieza a mostrar capacidad de absorber esfuerzos tras la aparición de la primera fisura, obteniéndose un comportamiento más plástico. La curva III presenta un comportamiento mucho más plástico bajo carga constante, retrasando incluso el punto de colapso. Por último, la curva IV presenta incluso un aumento de la capacidad de carga justo después de la aparición de la primera fisura.

La resistencia a rotura del HRF depende sobretodo del volumen y la esbeltez de las fibras. Se pueden lograr incrementos de hasta el 100% respecto de la resistencia de la matriz si se emplean fibras de extremos conformados (Gimenez, 1987) [18]. No obstante, contenidos de fibras bajos y con baja esbeltez, no consiguen incrementos significativos de resistencia a flexotracción. (Hannant, 1978). [7]

2.1.4.4. Resistencia a cargas dinámicas (impacto)

La resistencia a impacto de los HRF es muy superior a la de los hormigones convencionales en masa. El hecho de llevar fibras, hace que la matriz de hormigón tenga una tendencia mucho menor a la desfragmentación y al arrancamiento. Asimismo, se produce un importante incremento de la capacidad de absorción de energía por impacto. Todo esto depende directamente de la geometría y cantidad de las fibras. Los HRF pueden, por tanto, aumentar la resistencia a cargas dinámicas de 3 a 10 veces en comparación a los hormigones en masa. (ACI 544.4R-88, 2009). [19]

2.1.4.5. Tenacidad

La tenacidad es la energía de deformación total que puede absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura. Se debe principalmente al grado de cohesión entre las partículas. Normalmente se cuantifica como el área bajo la curva carga-flecha obtenida de forma experimental. Usualmente se emplea el ensayo de flexotracción para evaluar esta propiedad, ya que es mucho más simple de realizar que el de tracción directa y permite simular condiciones de carga para muchas aplicaciones prácticas.

La curva carga-flecha depende principalmente de la geometría del elemento (sus dimensiones), de los puntos de carga, de la velocidad de carga y del criterio de control del ensayo (apertura de fisura, carga, flecha, etc).

En los métodos de ensayo más utilizados se evalúa la tenacidad mediante una flecha máxima establecida con unos índices de tenacidad "It" que depende de múltiplos de la flecha a primera fisura. Éste valor depende del contenido de fibras, del tipo y la esbeltez de estas. La matriz no influye prácticamente nada, ya que los índices reflejan el incremento de la tenacidad debido a las fibras y no a otros mecanismos como el incremento de resistencia a primera fisura. (ACI 544.4R-88, 2009). [19]

2.1.4.6. Cortante y Torsión

La resistencia a torsión y cortante de los hormigones aumenta ligeramente con la adición de fibras. Éstas hacen que se produzca una fisuración más distribuida, además de incrementar la capacidad de carga última a cortante, como se ha demostrado en ensayos experimentales de vigas de HRFA armadas (Barragán, 2002). [20]

La combinación de fibras y estribos incrementan mucho la ductilidad, pero no influye demasiado en la resistencia a cortante respecto a las vigas que cuentan únicamente con estribos como armadura de cortante. (Valle & Büyüköztürk, 1993) [21]

2.1.4.7. *Punzonamiento*

Ensayos experimentales han demostrado que se producen roturas por punzonamiento más graduales y dúctiles, con una fisuración previa a la rotura mucho mayor y un aumento de la resistencia después de la fisuración al emplear volúmenes de fibras mayores al 0.5%. Este efecto depende del contenido de fibras, su capacidad adherente y su esbeltez. Se han obtenido incrementos de resistencia a la rotura por punzonamiento de hasta el 42% con el empleo de fibras en el hormigón. (ACI 544.4R-88, 2009). [19]

2.1.4.8. *Adherencia fibras-matriz*

Tras la fisuración, el comportamiento del HRF depende directamente de la adherencia entre las fibras y la matriz de hormigón, ya que éstas se encargan de coser las fisuras y retrasar el agotamiento del material compuesto, convirtiéndolo en un material dúctil. Para elevar la absorción de energía se deben producir el arrancamiento de las fibras (pull-out), y no la rotura de éstas.

La esbeltez de las fibras es un parámetro clave para el incremento de la adherencia. Un ejemplo de esto lo podemos encontrar en un ensayo en el que se demostró que tres fibras de esbeltez 100, obtuvieron una resistencia al arrancamiento un 50% mayor a la obtenida por una única fibra de esbeltez 75 y de volumen equivalente a las tres anteriores (Giaccio, Giovambattista, & Zerbino, 1986). [22]

En otro ensayo se demostró que cuanto menor sea la rectitud de las fibras, mayor será su adherencia. En este caso se ensayaron tres tipos de fibras del mismo material y área, una circular recta, otra circular con extremos conformados y otra triangular retorcida. La fibra triangular obtuvo resistencias de adherencia 400% mayores que la circular recta y 200% mayores que la circular con extremos conformados. Asimismo, la energía de arrancamiento de la fibra triangular fue 2.5 veces mayor que la circular de extremos conformados (Naaman, 2000) [12]

2.1.5. *Durabilidad del hormigón reforzado con fibras*

La adición de fibras en el hormigón hace que éste, al fisurarse, sufra la aparición de muchas fisuras de abertura muy inferior a la de las producidas en los hormigones sin fibras, esto supone una gran ventaja en cuanto a la durabilidad, ya que se dificulta la entrada de agentes externos que puedan perjudicar al hormigón.

En los HRFA el mayor problema existente es el de la corrosión. No obstante, las fibras presentan una buena resistencia a la misma, ya que se encuentran protegidas en el interior de la matriz. La corrosión, de hecho, sólo afecta a las fibras que se encuentran en la capa superficial del hormigón, hasta unos dos milímetros aproximadamente desde la superficie. Esta protección es efectiva cuando el hormigón no se encuentra fisurado, ya que al fisurarse se facilita la entrada de agentes externos que pueden aumentar la profundidad de la corrosión. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que incluso los HRFA sin fisuras expuestos a agua de mar presentan una buena resistencia a la corrosión (Serna & Arango, 2008) [23]. La resistencia a la corrosión de las fibras de acero, puede además mejorarse si éstas llevan recubrimiento de zinc (Nemegeer, Vanbrabant, & Stang, 2000) [24]. Los problemas de corrosión que afectan a los HRFA no son aplicables a los HAFP.

Por otra parte, respecto al efecto de carbonatación, ésta no se ve afectada por el hecho de que el hormigón lleve fibras o no, sino por el hormigón en sí. (Nemegeer et al., 2000) [24]

Por último, en cuanto a los problemas de durabilidad achacados a los ciclos de hielo-deshielo, no se presenta una mejora con la adición de fibras de ningún tipo. Es necesario, por tanto, emplear aditivos aireantes como si de un hormigón tradicional se tratase. (O'neil & Devlin, 1999) [25]

2.1.6. Ventajas del hormigón reforzado con fibras

Las ventajas más importantes de los HRF son las siguientes:

- Son fáciles de aplicar al hormigón, tanto a pie de obra como en planta hormigonera.
- Permiten sustituir al mallazo.
- Convierten al hormigón en un material dúctil.
- Reducen la abertura de fisura, mejorando la durabilidad.
- Proporcionan un refuerzo homogéneo y de comportamiento tridimensional.
- Evita errores de colocación de armadura, ya que para ciertas aplicaciones, la sustituye.
- Las fibras se pueden adicionar directamente al camión hormigonera durante el vertido.
- Reducen la retracción del hormigón.
- Es rápido y fácil de aplicar.
- Al emplear fibras de polipropileno, se mejora el comportamiento frente a fuego.

2.2. Hormigón con áridos reciclados

2.2.1. Definición

Uno de los problemas más importantes en la construcción actual es la generación de residuos que conlleva y el desaprovechamiento de los mismos. Estos desechos se acumulan en grandes cantidades en vertederos donde no son tratados de manera adecuada, lo cual genera un alto impacto ambiental. Esta industria, asimismo, requiere de la extracción de grandes cantidades de recursos naturales, utilizando aproximadamente 10 billones de toneladas de áridos al año para la producción de hormigón. Esto está directamente relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero, la pérdida de suelo y la deforestación (Mehta, 2001). [26]

Se ha demostrado que se pueden utilizar áridos reciclados procedentes de demoliciones de obras para la sustitución parcial de áridos de forma muy efectiva. No obstante, la industria de la construcción no está mentalizada para dar el paso a una mayor utilización de los mismos asociándolos a una disminución de la calidad. Es por tanto trabajo de los investigadores demostrar lo contrario. En este estudio se pretende demostrar que el empleo de estos áridos es compatible con la adición de cualquier tipo de fibras sin disminuir su calidad.

2.2.2. Antecedentes

La investigación del hormigón con áridos reciclados fue iniciada en 1946 por Glushge (1946) [27] en Rusia, el cual detectó que estos áridos tienen una densidad menor que los naturales y que su uso conlleva a una menor resistencia a compresión.

Más adelante se llevaron a cabo investigaciones sobre los procesos de trituración de los áridos reciclados, diseños de mezclas, propiedades mecánicas y durabilidad de hormigones con estos áridos, destacando la mayor absorción de los ARD (Buck, 1973 [28]; Malhorta, 1976 [29]; Frondistou-Yannas, 1977 [30]; Nixon, 1978 [31]). Otra característica de los áridos reciclados es su menor densidad y mayor contenido en aire (Malhorta, 1976) [29] y una menor resistencia a compresión con la misma relación a/c que un hormigón con áridos naturales. No obstante, el uso de adiciones minerales como cenizas volantes mejora la resistencia (Buck, 1977). [32]

Investigaciones más recientes en vigas [33], [34], columnas (Konno K. (1997)) [35] y uniones de vigas y columnas (Corinaldesi V. (2003)) [36] hechas de hormigón con áridos reciclados dieron todos resultados positivos. Ninguno de los resultados previos indicó que el árido reciclado no sea adecuado para aplicaciones estructurales. J.-Zh. Xiao (2006) [37] realizó un estado del arte comparando la recopilación de resultados obtenidos por los investigadores de hormigón con áridos reciclados hasta la fecha, añadiendo también resultados propios. Empleando una regresión estadística analítica, obtuvo ecuaciones relacionando las características del hormigón con áridos reciclados y hormigón con áridos normales. Estas ecuaciones las comparó con las propuestas en el ACI.

En 2009, A. Abbas [38] realizó estudios sobre la durabilidad de este tipo de hormigones utilizando un nuevo método de dosificación llamado “método del volumen de mortero equivalente”. Con este método obtuvo mejores resultados de resistencia a compresión y de durabilidad que los hormigones con RCA dosificados de manera común. También se han realizado estudios de durabilidad de hormigones armados con RCA en ambientes marinos, evaluando la corrosión (A. Ulloa, 2012).

La importancia dada actualmente al estudio de los RCA lleva a la aparición de proyectos para la creación de guías. En España aparece la Guía Española de Áridos Reciclados (GEAR Project, 2011) [39], coordinado por el GERD (Asociación española de Gestores de Residuos de Construcción y demolición), y financiado por el Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino, donde participan numerosas entidades del sector para estudiar los áridos reciclados producidos en España y su uso potencial en diversas aplicaciones. El GERD, representa los intereses de las empresas dedicadas a la gestión del vertido y al reciclaje de los residuos de construcción y demolición. Las materias primas que promueven son materiales minerales inorgánicos, previamente usados en construcción que, tras someterlos a procesos y tratamientos adecuados y a controles de calidad, vuelven a ser productos competitivos en los mercados. El uso estrella son los áridos reciclados 0/45 de alto estándar para la construcción de bases y subbases de carreteras que suponen el 70% de la industria y mercados europeos del reciclaje de RCDs. Asimismo, GERD es miembro corporativo de AENOR, entidad representante del CEN en España y única autorizada para elaborar Normas técnicas en nuestro país. Como socios corporativos participan muy activamente en los tres Comités Técnicos de Normalización, competentes en la regulación técnica de actividades y productos de la gestión y valorización de los RCDs. [40]

Recientemente, se han realizado estudios sobre la Influencia del tiempo de amasado y de la humedad de los áridos en las características mecánicas del hormigón reciclado (A. Guillén, 2014) [41], donde se destaca la importancia del control de la humedad de los mismos para obtener resultados aceptables en hormigones estructurales.

En 2015, Xiao JZ [42] realizó pruebas de ensayos a flexión de losas escalonadas de hormigón con áridos reciclados. Este mismo investigador, junto a Li, Wengui [43], realizó un extenso estado del arte del hormigón con RCA desde 2005 hasta 2014.

Los áridos reciclados procedentes de demoliciones reúnen las características idóneas para emplearse en la realización de pavimentos de hormigón. En la realización de los mismos se emplean grandes cantidades de hormigón y, al no ser elementos puramente estructurales, aceptan la asunción de posibles heterogeneidades en la composición de los áridos. Es igualmente una buena manera de dar salida a la gran cantidad de residuos que se generan tras las demoliciones de obras que, de otra manera, irían a parar a vertederos, con el impacto ambiental que ello supone. Asimismo, evita que se recurra constantemente a la explotación de canteras, las cuales tienen una capacidad limitada. Es por todo esto que vale la pena investigar para demostrar que el empleo de áridos reciclados en pavimentos de hormigón no supone una pérdida de calidad de los mismos y son compatibles con las dosificaciones y técnicas tradicionales.

2.3. Hormigones para pavimentos

La parte central de este estudio se basa en el análisis de hormigones para pavimentos de hormigón con fibras, con inclusión parcial de áridos reciclados en parte de las amasadas. Los hormigones para pavimentos se pueden estudiar de diversas maneras. En un principio, los métodos se pueden diferenciar en dos grandes grupos: Empleando elementos de magnitud equivalente a la realidad (placas de hormigón de grandes dimensiones), o empleando probetas de hormigón de dimensiones reducidas, cuyo comportamiento pueda definir el de un pavimento de mayor escala. En este punto se hará una revisión a los estudios existentes sobre los dos métodos. En el método que emplea elementos de dimensiones reducidas se tratarán los estudios sobre paneles redondos, ya que es el método en el que más se centra este estudio.

2.3.1. Elementos de grandes dimensiones

En cuanto al empleo de elementos de gran magnitud, unos de los investigadores que más aportaron a éste campo fueron Sorelli, Meda, y Plizzari (2006) [44], los cuales realizaron múltiples placas de hormigón reforzado con fibras de acero con distintas proporciones y formas, estudiando su comportamiento estructural. Como resultado experimental obtuvieron que con un contenido bajo de fibras de acero en el hormigón se mejora la capacidad de carga de este y hacen trabajar con mayor ductilidad a la estructura. Los pavimentos estudiados por este equipo tenían dimensiones de 3x3x0.15 m y se sometieron a una carga puntual en el centro de este. Para reproducir el suelo utilizaron el modelo de Winkler utilizando 65 muelles de acero separados en ambas direcciones a 375 mm. Estos midieron la constante de los muelles teniendo como resultado un valor de 11 kN/mm por lo que con el área tributaria que le correspondía a cada muelle le daba un módulo de reacción del suelo de 78.5 MPa/m.

Por otra parte, Bothma (2013) [45] fabricó cuatro placas de hormigón de dimensiones 2x2x0.12 m, dos de hormigón reforzado con fibras de acero HRFA y dos de hormigón en masa, con el objetivo medir la ductilidad a flexión del hormigón con fibras en pavimentos apoyados sobre el suelo, además de comprobar los resultados del ensayo con los cálculos teóricos respecto a las cargas de rotura. Para simular el suelo utilizó 169 muelles con una rigidez de 220 n/mm, separados a una distancia de 150 mm en ambas direcciones, con lo cual obtuvo un valor de módulo de reacción del suelo de 10MPa/m. Las placas de hormigón fueron cargadas en el borde, y se obtuvo como resultado un modo de fallo más dúctil en las placas de hormigón con fibra respecto a las de hormigón convencional.

J.G. Guzmán (2015) [46] analizó y comparó una placa de hormigón en masa de 26 cm de espesor y otra de hormigón con fibras metálicas de 20 cm de espesor. La diferencia de espesor se debe a la equivalencia que marca la ROM 4.1-94. Ambas placas eran de 4 por 4 metros y se ensayaron sobre una cama de 73 muelles que simulaban el terreno de una zona portuaria. Un gato hidráulico aplicaba la carga en el centro, la cual se distribuía en cuatro puntos. Durante el experimento se monitorizó el comportamiento en varios puntos de la placa.

El presente estudio, trata de continuar el estudio de J. G. Guzmán. No obstante, al igual que los métodos empleados en los estudios anteriores, carece de practicidad y requiere una gran inversión para obtener pocos datos válidos. Es por ello, que en el presente estudio se ha propuesto un programa experimental diferente, en el cual se estudiarán muchas probetas de dimensión más reducida, simulando el comportamiento de pavimentos reales, de manera que se obtengan más resultados y se permita analizar tipos de hormigones más diversos con un coste en tiempo y capital menor.

Para estudiar hormigón para pavimentos con elementos de tamaño reducido, se pueden emplear diferentes métodos. Normalmente, se emplean ensayos de flexotracción a probetas prismáticas normalizadas. Éste método tiene la ventaja de que es fácilmente accesible y existen una gran cantidad de estudios que lo emplean, por tanto, se tiene un gran conocimiento del mismo. Por otra parte, pueden emplearse placas cuadradas de tamaño reducido y pequeño espesor, cuyos resultados puedan extrapolarse a una placa de mayor tamaño y geometría similar. Por último, también pueden emplearse elementos similares al anteriormente descrito, pero en este caso circulares, conocidos como paneles redondos. Estos dos últimos métodos empleados no son tan utilizados, pero su empleo está comenzando a crecer debido a las ventajas y posibilidades que ofrecen frente a las probetas prismáticas normalizadas.

Tras analizar diferentes posibilidades se ha decidido emplear el ensayo ya existente de la ASTM C 155-08, el cual emplea una probeta en forma de panel redondo que simula de forma muy acertada las características de un pavimento. Uno de los objetivos de este estudio será por tanto, tratar de equiparar y dar validez a este ensayo frente a los empleados en los estudios anteriormente citados, en los cuales se empleaban menos probetas y mucho más grandes.

2.3.2. Ensayo de Round Panel

Como se ha comentado en el anterior apartado, uno de los puntos fuertes del presente estudio es el estudio de hormigones destinados a pavimentos utilizando el método descrito en La ASTM C 1550-08. Ésta instrucción propone un ensayo de flexotracción con mayor área de rotura, el cual se realiza a una placa circular. Con los ensayos realizados a probetas prismáticas se obtiene una gran dispersión y el uso de una placa rectangular daría lugar a una mala distribución de las tensiones por las irregularidades geométricas. El hecho de que éste método se realice con una probeta circular, asegura una distancia entre la aplicación de carga y los extremos igual, y de esta forma, una distribución de tensiones internas uniforme. Estas ventajas respecto a los métodos tradicionales han sido demostradas por varios estudios. (A.M. Brandt, 2009) [47]. Un estudio realizado por Lucie Vandewalle (2008), compara el ensayo de Round Panel (ASTM C1550-08) [48] con el de flexotracción a tres puntos (EN 14651:2005) [49]. En éste estudio señala que las probetas prismáticas empleadas en los ensayos de flexotracción a tres y cuatro puntos, tienden a sufrir una mala distribución de fibras y un área de rotura pequeña, por tanto, propone ya de partida el empleo de probetas con un área de rotura mayor, demostrando así la idoneidad de la probeta cilíndrica empleada en el ensayo del round panel (ASTM C1550-08) [48].

Se ha demostrado, asimismo, que la dispersión del método anteriormente citado tiene una dispersión menor del 50% respecto a los métodos tradicionales a tres y cuatro puntos con probetas prismáticas. Como resultado del estudio, obtuvo variaciones de resultados menores en el ensayo de Round Panel tanto para fibras metálicas como sintéticas. No obstante, obtuvo que las dimensiones del Round Panel no tienen influencia sobre el valor de la dispersión cuando se utilizan fibras metálicas, pero sí cuando se emplean fibras sintéticas, aumentando la dispersión con la reducción de espesor del panel.

E.S. Bernard (2008) [50] Realizó un análisis para establecer la influencia de la ubicación de las tres grietas radiales que se producen durante la prueba del panel redondo, la magnitud de los ángulos de rotación de grietas y la resistencia a la carga posterior a la grieta en estos especímenes. Concluyó que la localización de las tres grietas radiales tiene, en promedio, un efecto relativamente pequeño sobre la magnitud de la resistencia de carga en el centro pero, que contribuyen en una proporción relativamente grande a la variabilidad total en la resistencia de carga en comparación con los otros parámetros considerados.

Daniela Ciancio (2014) [51] propone el empleo de paneles redondos de menores dimensiones por la incomodidad de emplear los paneles estándar in situ, debido a su peso y sus dimensiones. Asimismo, pretende conseguir un método que estime la energía de rotura específica del material, basado en asunciones cinemáticas verificadas con herramientas numéricas complejas. En su estudio, emplearon hormigón vertido por motivos logísticos, al igual que en este estudio, dando por supuesto que los resultados obtenidos podían extenderse a los de un hormigón proyectado. Realizaron 9 paneles redondos de dimensiones diferentes, con diámetros de 800, 600 y 500 mm, todas ellas de 75 mm de grosor, como puede apreciarse en la tabla 3 empleando una mezcla de hormigón con la dosificación mostrada en la tabla 4.

Tabla 3. Características de las probetas empleadas [51]

Series	# Samples	Radius R [mm]	Distance from centre to support r [mm]	Thickness t [mm]	Effective thickness h [mm]	R/r
S-800	3	400	375	75	60	1.06
S-600	3	300	280	75	60	1.07
S-500	3	250	235	75	60	1.06

Tabla 4. Dosificación de hormigón [51]

Component	Dosage
Cement (ASTM type 1)	245 kg/m ³
Coarse aggregate (10/14/20 mm mix)	1050 kg/m ³
Fine aggregate	885 kg/m ³
Water	150 L/m ³
Fibrecorp corrugated steel fibre (aspect ratio 35:3 mm)	40 kg/m ³

Una de las curiosidades de este estudio es la realización de hendiduras de control de fisuración de 15 mm de profundidad realizadas en las probetas a estudiar, dejando un espesor efectivo en esas zonas de 60 mm (figura 16). La autora recomienda realizar los surcos posteriormente al endurecimiento empleando métodos mecánicos, debido a que la introducción de elementos en el molde que den forma a las muescas puede alterar la colocación y orientación de las fibras en esas zonas. El CMOD fue medido utilizando transductores de desplazamiento como los mostrados en la figura 13. Asimismo, las muestras en este estudio fueron apoyadas directamente sobre esferas, de manera que no se emplearon plataformas de transmisión.



Figura 12. Muecas realizadas en los paneles redondos [51]

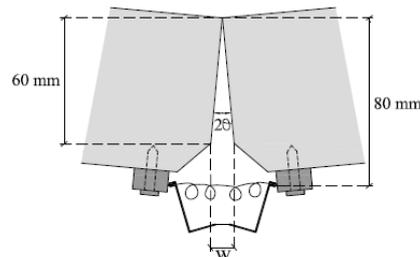


Figura 13. Captador de desplazamiento para analizar la apertura de fisura [51]

Los resultados obtenidos por los diferentes tipos de paneles fueron similares, como puede apreciarse en la figura 14.

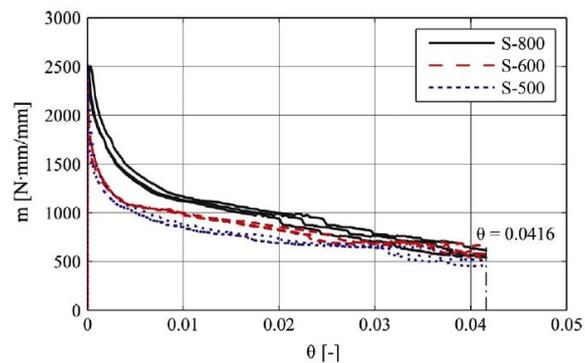


Figura 14. Curva ángulo de rotación / carga de las muestras ensayadas [51]

Tras la campaña experimental obtuvieron una ecuación que permite convertir la tenacidad de un panel redondo pequeño a la de uno estándar de 800 mm de diámetro, de manera que se permita el empleo de paneles redondos más pequeños in-situ, llevando anillos de ensayo transportables, ganando en tiempo y dinero.

$$E_{w_800} = E_{w_R} \frac{400}{R}, \quad R \text{ in mm.}$$

Otro estudio llevado a cabo por Fausto Minelli y Giovanni Plizzari (2013) [52] propone el empleo de paneles redondos de menores dimensiones. Los paneles estudiados tienen un diámetro de 600 mm (550 mm efectivos), 60 mm de grosor y un peso de 40 kg. Asimismo, el hormigón empleado contenía fibras metálicas en dos cantidades diferentes, 20 kg/m³ y 30 kg/m³. En su estudio demuestran que el test del panel redondo es más completo y fiable que el de probetas prismáticas a 3 puntos, como puede apreciarse en la figura 15.

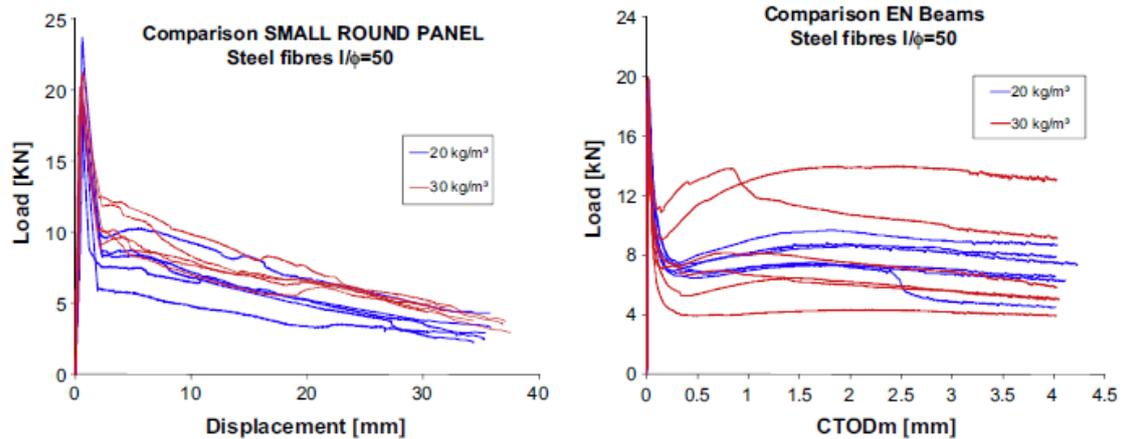


Figura 15. Comparación de resultados en paneles redondos y vigas [52]

En su estudio dejan patente la poca dispersión sufrida en los test con paneles redondos, adjudicando la mayor dispersión de los ensayos en vigas a su pequeña área de rotura, no al material en sí mismo.

En un estudio más reciente, Daniela Ciancio (2016) [53] se centró en la influencia del espesor de los mismos en su tenacidad, demostrando que la energía absorbida es dependiente del espesor, proponiendo un nuevo procedimiento de diseño que emplea las herramientas convencionales con el test de paneles redondos pequeños mellados, al cual llama MnRDP test, las características de los paneles empleados se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Características de los elementos empleados [53]

Component	Quantity per m ³
Water	205 kg
Cement	426 kg
10 mm aggregate	444 kg
7 mm aggregate	306 kg
<4 mm aggregate	130 kg
Sand	843 kg
Steel fibre	40 kg

Series	No. Panels	Thickness <i>t</i> [mm]	Radius <i>R</i> [mm]	Distance of support from center <i>r</i> [mm]
S-60	3	60	270	230
S-70	3	70	270	230
S-80	3	80	270	230

Pese a conocer que las características de la probeta cilíndrica empleada en el ensayo del Round Panel y las del propio ensayo son muy acertadas para predecir el comportamiento del hormigón con fibras en un pavimento, además de disponer de una creciente bibliografía e instrucciones, no se han realizado suficientes estudios experimentales para establecer definitiva y oficialmente éste método como el válido para caracterizar hormigones con fibras destinados a pavimentos. La motivación de esta investigación es por tanto, contribuir a la demostración que los datos que aparecen en las normativas e instrucciones se ajustan a la realidad mediante un programa de ensayos experimentales basados en la ASTM C 1550-08.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

En este capítulo se expone el programa experimental que se ha llevado a cabo para determinar la viabilidad de fabricar hormigones para pavimentos con fibras (de acero y de polipropileno) y áridos reciclados para tráfico ligero y comparar sus diferentes combinaciones, respecto a los realizados con hormigones tradicionales. En primer lugar se hablará sobre el desarrollo del mismo, el cual tratará el planteamiento del mismo, las variables que se han empleado y las fases del estudio. A continuación se expondrán y explicarán los materiales empleados. Tras esto se tratarán las dosificaciones empleadas en las amasadas llevadas a cabo durante el estudio. Por último, se explicará la metodología seguida para la realización de todo el programa experimental.

3.1. Desarrollo del programa experimental

Este estudio, como se ha comentado anteriormente, pretende en gran parte continuar el estudio de Gabriel Guzmán (2015) sobre hormigones con fibras destinados a pavimentos de hormigón utilizando placas cuadradas de grandes dimensiones sobre muelles. No obstante, este método está limitado por la poca capacidad de comparación de resultados, ya que se tienen pocos especímenes de prueba, es por ello que se ha optado por un cambio en el planteamiento.

3.1.1. Planteamiento

Para la realización de este estudio se ha optado por un programa más económico y práctico, el cual mantenga la esencia del estudio precedente y de sentido su continuidad. Por tanto, para la realización de éste estudio, en vez de ensayar pocas placas y de grandes dimensiones, se han realizado numerosas probetas más pequeñas de diferentes dimensiones y con diferente dosificación y tipo de fibras. Al ser ensayos que no requieren de una preparación e infraestructura tan compleja, utilizar elementos mucho más pequeños, ligeros y normalizados, se pueden realizar muchos más ensayos y obtener una gran cantidad de datos, que servirán para caracterizar de manera más práctica un hormigón destinado a pavimentos.

3.1.2. Variables

En este estudio, se parte de una matriz fija de hormigón fija, a la cual se le añaden diferentes variables. Estas variables son las siguientes:

1. Fibras de polipropileno BASF 248/249.
2. Fibras de acero Dramix 3D 45/50.
3. Fibras de acero Dramix 3D 65/60.
4. Áridos reciclados mixtos.
5. Aditivo superplastificante Sika® ViscoCrete® - 5980.

Se ha optado por utilizar diferentes tipos de fibras y en diferentes cantidades para entender mejor el comportamiento del hormigón con su uso. Los tipos y cantidades empleadas obedecen a criterios de practicidad y experiencia, ya que son tipos de fibras usados comúnmente en las obras de este tipo y en cantidades que se encuentran dentro de los valores recomendados por los fabricantes.

Para facilitar la definición de los diferentes tipos de hormigones, a partir de este punto del documento se abreviarán los nombres de los mismos de la siguiente forma:

Tabla 6. Abreviación de tipos de hormigón empleados

FP-5KG	5 kg/m ³ de fibras de polipropileno BASF 248/249
FP-10KG	10 kg/m ³ de fibras de polipropileno BASF 248/249
AR-FP-5KG	5 kg/m ³ de fibras de polipropileno BASF 248/249 y áridos reciclados mixtos
AR-FP-10KG	10 kg/m ³ de fibras de polipropileno BASF 248/249 y áridos reciclados mixtos
FM-45/50	20 kg/m ³ de fibras de acero Dramix 3D 45/50
FM-65/60	30 kg/m ³ de fibras de acero Dramix 3D 65/60
AR-FM-45/50	20 kg/m ³ de fibras de acero Dramix 3D 45/50 y áridos reciclados mixtos
AR-FM-65/60	30 kg/m ³ de fibras de acero Dramix 3D 65/60 y áridos reciclados mixtos

3.1.3. Fases del estudio

La campaña experimental ha sido dividida en tres fases bien diferenciadas. Cada fase está caracterizada por el cambio de probetas y dosificaciones empleadas.

Fase 1. Selección de matriz de referencia. En esta fase se procedió a caracterizar el hormigón de control, el cual serviría como base de las sucesivas amasadas, ya que en estas no se modificó la dosificación, únicamente el número de fibras. Se eligió una dosificación en función a la experiencia y comparación con estudios anteriores de hormigón para pavimentos. Tras el hormigonado de las primeras probetas de hormigón de control para comprobar la dosificación prevista, se detectó un exceso de árido 10/20 sobre el árido fino. Por tanto, se decidió realizar una segunda amasada modificando el porcentaje de áridos. En la segunda amasada se igualó el contenido de áridos y arena. Asimismo, cambió el porcentaje entre árido 10/20 y 6/10. En la primera amasada se ha utilizado un 70% de árido 10/20 y 30% de árido 6/10, mientras que en la segunda, esta relación se cambió a 65% y 35% respectivamente. Ambas dosificaciones contaban con una relación agua/cemento de 0,53. La dosificación de estos hormigones se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Dosificación de hormigones de control

Tipo de hormigón	1 m3	
	HC-1	HC-2
Cemento	300	300
Agua total	182	182
Árido (12/20)	666,5	587,6
Árido (6/12)	286,5	316,4
Árido fino	855	904
Aditivo (0.5%)	1,5	1,8
Asiento en cono	16	15

De cada uno de los potenciales hormigones de control se fabricaron seis probetas cilíndricas, de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3:2009 para obtener la resistencia a compresión de los dos hormigones. De esas seis probetas, tres se ensayaron a siete días y tres a 28 días.

Fase 2. Análisis del comportamiento del hormigón tras la adición de fibras. Tras haber decidido qué dosificación de hormigón se emplearía (HC-2), comenzó una campaña de estudios experimentales de probetas cilíndricas según la norma UNE-EN 12390-3:2009 y prismáticas de hormigón según norma UNE-EN 14651:2007+A1, 2008. En estas amasadas se comenzó a añadir

fibras de polipropileno BASF MasterFiber 249 en diferentes cantidades (5kg y 10 kg por metro cúbico de hormigón); y fibras metálicas de los tipos 45/50 y 65/60, en cantidades de 20kg y 30kg respectivamente por metro cúbico de hormigón. La dosificación empleada fue la misma que en el hormigón de control con excepción de la cantidad de aditivo, la cual se ha aumentó debido a la disminución de la trabajabilidad que conlleva la adición de fibras. En esta fase se realizaron en cada amasada 4 probetas cilíndricas y 5 probetas prismáticas para la realización de ensayos a compresión y a flexotracción.

En la segunda parte de ésta fase, se comenzó con la realización y el ensayo de paneles redondos según la ASTM C 1550-08 con adición de las fibras anteriormente citadas, realizando además en cada amasada, probetas cilíndricas y prismáticas adicionales. La dosificación de las amasadas no se vio alterada, pero sí la cantidad de probetas realizadas, pasando a realizarse en cada amasada un panel redondo, dos probetas cilíndricas y dos prismáticas. Para cada tipo de hormigón se realizaron dos amasadas.

Fase 3. Análisis del comportamiento del hormigón con fibras tras incorporar áridos reciclados.

En la presente fase, se realizó exactamente lo mismo que en la fase 3, pero con sustitución del 50% en volumen de árido grueso por árido reciclado procedente de demolición de obras, previo análisis del mismo. Para ello se tuvo que hacer un estudio de la densidad y la absorción de los áridos reciclados según la norma UNE-EN 1097-6, 2014, tras lo cual se modificaría la dosificación del hormigón. Asimismo, se realizó un estudio de la composición de los áridos reciclados empleados.

Tras la extensa campaña experimental llevada a cabo, se compararon y analizaron todos los resultados obtenidos en las diferentes fases de este estudio y estudió la viabilidad de los hormigones empleados para la realización de pavimentos de baja intensidad de tráfico.

En la tabla 8 se muestra el plan de trabajo realizado en este estudio durante las diferentes fases, especificando el número de ensayos que se han llevado a cabo.

Tabla 8. Plan de trabajo del estudio

	HORMIGONES	Nº AMASADAS	M ³ /AMASADAS	TIPO ENSAYO	ENSAYOS POR AMASADA
FASE 1 Caracterización del hormigón de control	HC-1	1	0,04 m3	Compresión 7 días	3
	HC-2			Compresión 28 días	3
FASE 2 Análisis del comportamiento del hormigón tras la adición de fibras	HFP 5 KG	1	0,11 m3	compresión 28 días	4
	HFP 10 KG			flexotracción 3 puntos	5
	HFM 45/50	2	0,104 m3		
	HFM 65/60			flexotracción 3 puntos	2
	HFP 5 KG			Round panel	1
	HFP 10 KG				
	HFM 45/50				
	HFM 65/60				
HC					
FASE 3 Análisis del comportamiento del hormigón con fibras tras incorporar áridos reciclados	AR HC	1	0,09 m3	compresión 28 días	3
	AR HFP 5KG	1	0,09 m3	compresión 28 días	2
	AR HFP 10 KG	2		flexotracción 3 puntos	2
	AH HFM 45/50			Round panel	1
	AH HFM 65/60				

3.2. Materiales a utilizar

3.2.1. Cemento

Para la realización de todos los hormigones citados anteriormente, se ha empleado un cemento CEM II/A-V 42.5 R. Este cemento portland contiene adiciones de ceniza volante silíceas en una proporción del 6 al 20%, lo cual favorece a obtener unas altas resistencias iniciales. La cantidad de cemento se ha mantenido estable en todas las dosificaciones, incluso en aquellas que contenían áridos reciclados mixtos.

3.2.2. Agua

El agua empleada para la realización del hormigón ha sido la que se suele emplear con normalidad en las obras, es decir, agua común obtenida directamente del grifo. Hay que destacar que el agua de la ciudad de Valencia es muy alcalina, teniendo un pH del 8.2, el cual es

muy elevado y presenta una alta conductividad eléctrica (948 microsiemens por segundo). Otra de las características del agua de valencia es que es una de las aguas con más dureza de toda España, ya que ésta contiene una alta concentración de compuestos minerales como las sales de magnesio o el calcio. [54]

3.2.3. Áridos

Para la realización de todos los hormigones, se han empleado los áridos machacados disponibles en el laboratorio. Los áridos elegidos han sido de clasificación 12/20, 6/12 y arena rodada.

Asimismo, en las amasadas con sustitución parcial por áridos reciclados, se han empleado unos áridos reciclados mixtos los cuales se encontraban ya disponibles en el laboratorio. Estos áridos se han sustituido en un 50% del volumen de los áridos 6/12 y 12/20.

A los áridos reciclados mixtos se les realizó una serie de pruebas para caracterizarlos. Por una parte, se realizó un análisis de la absorción y la densidad de los mismos para ajustar la dosificación resultante y que fuera equivalente a la de los hormigones con áridos tradicionales empleados y ensayados hasta la fase 4. La densidad de los áridos reciclados depende mucho de la composición de los mismos, pero casi siempre es menor que la de los áridos naturales. Esto se debe en parte a que los ARM tienen mortero adherido a su superficie, el cual es mucho más poroso que los materiales pétreos, llegando a ser la densidad por esta razón, entre un 5 y un 10 % que la de los áridos naturales. Asimismo, los áridos reciclados que incluyen elementos cerámicos, como es el caso de los empleados en este proyecto, tienen una densidad incluso más baja. La absorción es la propiedad que presenta una mayor variación respecto a los áridos naturales. Ésta va ligada directamente a la densidad de los componentes.

Para estudiar densidad y la absorción de los ARM se siguieron las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN 1097-6 2014. El primer paso es meter la porción de ensayo en una estufa hasta que alcance masa constante, se deja enfriar a temperatura ambiente y se pesa para obtener M1. Tras esto se introduce la porción de ensayo en una cesta metálica y se sumerge en un tanque con agua cubriéndose con al menos 50 mm de agua sobre la parte superior de la cesta. A continuación se eleva la cesta 25 mm por encima de la base del tanque y se deja caer 25 veces para retirar todo el aire atrapado. Tras dejarlo reposar 10 minutos se pesa la porción de ensayo dentro del agua y se obtiene M2. Por último se retira la muestra de la cesta y se vuelve a introducir la cesta en el tanque para pesarla, previa retirada de aire mediante sacudidas.



Figura 16. Introducción de cesta en tanque para toma de datos

Con todos los datos recogidos se obtiene la densidad mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_p = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

Densidad de Árido reciclado Mixto	
M1	2214
M2	2419
M3	1221
ρ_w	1
ρ_p	2,18

donde

M1	Masa de la porción de ensayo pre-secada
M2	Masa en agua de la cesta que contiene la porción de ensayo bajo el agua, en gramos
M3	Masa en agua de la cesta vacía
ρ_w	Densidad del agua a la temperatura de ensayo, en mega gramos por metro cúbico
ρ_p	Densidad de partículas

A partir de los datos obtenidos en el proceso de cálculo de la densidad de los ARM podemos obtener también el valor de la absorción de los mismos. Para ello deberíamos obtener la masa de la porción del ensayo anterior tras retirarla del tanque, previo secado superficial de la misma para obtener un nuevo M1. Por último. Se debe secar en estufa los áridos saturados hasta obtener masa constante y se obtiene M3. Con estos datos se calcula la absorción mediante la siguiente expresión:

$$W_{Acm} = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

Absorción del Árido reciclado Mixto	
M1	2328
M2	2535
M3	2167
W_{Acm}	7,43

donde

M1	Masa de la porción de ensayo saturada y secada superficialmente, en gramos.
M2	Masa aparente en agua de a porción de ensayo saturada
M3	Masa de la porción de ensayo secada superficialmente, en gramos
W_{Acm}	Absorción de agua

Para estudiar la composición de los ARM empleados, se siguieron las indicaciones de la norma UNE-EN 933-11:2009. Parte 11. En este método se separó una fracción de 20 kg de muestra de

Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico.

ARM, la cual se introduce en un horno para su secado. Tras tomar datos del peso de la muestra, el siguiente paso es tamizarlo por un tamiz 63mm y otro de 4mm y se pesa de nuevo la porción obtenida. Tras esto se sumerge la porción de ensayo en un tanque hermético y se recogen las partículas flotantes para calcular su volumen. El siguiente paso es el secado de las partículas no flotantes y se separan los componentes para su pesado.

Tabla 9. Componentes no flotantes de los áridos gruesos reciclados (UNE-EN 933-11:2009)

Componente	Descripción
Rc	Hormigón, productos de hormigón, mortero Unidades de albañilería de hormigón
Ru	Áridos no tratados, piedra natural Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos
Rb	Unidades de albañilería de arcilla (es decir, ladrillos y tejas) Unidades de albañilería de silicato cálcico Hormigón aireado no flotante
Ra	Materiales bituminosos
Rg	Vidrio
X	Otros: Cohesivos (es decir, arcilla y arena) Varios: metales (ferrosos y no ferrosos), madera no flotante, plástico y caucho Yeso

Tras la realización del ensayo el resultado de la cantidad de componentes se recoge en la tabla 10:

Tabla 10. Porcentaje de componentes de los ARM empleados

Componentes	Porcentaje de componente
% Ra	4,6
% Rb	15,8
% Ru, Rc	79,1
% Rg, FL, X	0,5



Figura 17. Componentes de los ARM empleados.

3.2.4. Fibras

Como se ha señalado anteriormente, en este estudio se han empleado tres tipos de fibras diferentes de dos materiales diferentes, polipropileno y acero. Estas fibras se han aplicado en diferentes dosificaciones.

3.2.4.1. Fibras de polipropileno

En este estudio se han empleado tres tipos de fibras diferentes para las sucesivas amasadas.

Las fibras de polipropileno adicionadas al hormigón pertenecen a la empresa BASF. El nombre de las mismas es MasterFiber 249, y se han incorporado al hormigón en dos cantidades por m³ diferentes, 5kg/m³ y 10 kg/m³. Las propiedades de las fibras se pueden apreciar en la tabla 11.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno BASF Masterfiber 249

Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno BASF MasterFiber 249	
Material	Polipropileno
Forma	Monofilamentada grafitada
Diámetro equivalente / Sección	0.84 mm / 0.55 mm ²
Frecuencia de la fibra (ud/Kg)	41200
Longitud de la fibra	48 mm
Esbeltez	57 mm
Resistencia a tensión	<400 MPa Según el método UNE-EN ISO 6890-1-2009
Densidad	0.91 g/cm ³
Módulo de elasticidad	4,0 GPa Según el método UNE-EN ISO 6892-1 2009
Temperatura de distorsión	110 °C
Temperatura de descomposición	249 °C
Inflamabilidad	No aplicable
Resistencia a ácidos / álcalis	Excelente

Las fibras empleadas son de polipropileno en su totalidad. Este es un polipropileno de altas prestaciones por su alta resistencia a tracción y su adherencia a la matriz de hormigón. El uso de este tipo de fibras está aconsejado tanto para hormigones tradicionales como para hormigones prefabricados. En algunas amasadas se han combinado fibras BASF MasterFiber 249 y fibras BASF MasterFiber 248. Sus propiedades son idénticas, la única diferencia entre ellas es su color, unas son blancas y otras negras.



Figura 18. Fibras de polipropileno BASF MasterFiber 249 y 248

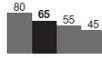
Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico.

3.2.4.2. Fibras de Acero

En este estudio se han empleado dos tipos diferentes de fibras de acero, ambos de la compañía BEKAERT y denominación Dramix. Dramix® tiene conformidad con la ASTM A820 y dispone del certificado para uso estructural conforme a la EN 14889-1.

Por una parte se han empleado fibras de acero Dramix 3D 65/60BG, las cuales se han adicionado a razón de 30 kg por m³. Las propiedades de estas fibras se resumen en la tabla 12.

Tabla 12. Propiedades de las fibras de acero Dramix 65/60

Rendimiento de Dramix 3D 65/60							
Propiedades del material			Geometría			Red de fibra	
Resistencia a tracción	Rm,nom	1160 N/mm ²	Gama de fibras	3D		Km por m ³	3 km/m ³ (para 15 kg/m ³)
	Tolerancias	± 7,5% promedio	Longitud (l)	60 mm			
Módulo de Young	± 210000 N/mm ²		Diámetro (d)	0,90 mm		Fibras/kg	3183
			Proporción (l/d)	65		Dosificación mínima	15 kg/m ³

También se han empleado fibras de acero Dramix 3D 45/50BL, adicionadas en cantidades de 20 kg por m³. Las características de estas fibras se muestran a continuación.

Tabla 13. Propiedades de las fibras de acero Dramix 45/50

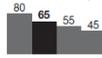
Rendimiento de Dramix 3D 45/50							
Propiedades del material			Geometría			Red de fibra	
Resistencia a tracción	Rm,nom	1115 N/mm ²	Gama de fibras	3D		Km por m ³	2,9 km/m ³ (para 20 kg/m ³)
	Tolerancias	± 7,5% promedio	Longitud (l)	50 mm			
Módulo de Young	± 210000 N/mm ²		Diámetro (d)	1,05 mm		Fibras/kg	2802
			Proporción (l/d)	45		Dosificación mínima	20 kg/m ³



Figura 19. Fibras Dramix 45/50 empleadas

3.2.5. Aditivo

El hecho de emplear hormigones con fibras obliga al empleo de aditivos fluidificantes, ya que de otra forma, sería muy complicado obtener consistencias trabajables en las amasadas sin modificar la cantidad de agua.

El aditivo empleado es el Sika® ViscoCrete® - 5980, el cual, según el fabricante es un aditivo superplastificante de tercera generación indicado para hormigones de bombeo.



Figura 20. Garrafa de aditivo superplastificante

3.3. Dosificación

Como se ha citado anteriormente, en este estudio se han empleado varios tipos de hormigón, en la mayoría de los cuales se ha mantenido la dosificación base constante, pero variando únicamente la cantidad de aditivo en función de las necesidades, además de la adición de fibras, según tipo y cantidad. En la fase 4 se modificó la dosificación por la adición de áridos reciclados, los cuales demandaban mayor cantidad de agua debido a su mayor grado de absorción. Las dosificaciones finales empleadas se muestran en las siguientes figuras, en todas ellas las cantidades vienen dadas por m³ de hormigón. El aditivo empleado en las sucesivas amasadas ha variado en cantidad desde el 0.8% del peso del cemento hasta el 1.5% del peso del cemento. Los porcentajes más altos de aditivo empleado se han coincido con los hormigones que contenían fibras y áridos reciclados, y particularmente más en los que contenían 10 kg de fibras de polipropileno, ya que el volumen de fibras total es el mayor de todos los hormigones realizados y por tanto, eran los que experimentaban una pérdida de la trabajabilidad mayor.

Tabla 14. Dosificaciones de hormigones de control.

HC-1		HC-2		AR HC	
Cemento	300	Cemento	300	Cemento	300
Agua total	182	Agua total	182	Agua total	202,459953
Árido (12/20)	666,5	Árido (12/20)	587,6	Árido (12/20)	293,8
Árido (6/12)	286,5	Árido (6/12)	316,4	Árido (6/12)	158,2
Árido fino	855	Árido fino	904	Árido fino	904
				ARM	378,83404

Tabla 15. Dosificaciones de hormigones con fibras de polipropileno y acero.

HFS 248 - 5 kg/m3		HFS 248 - 10 kg/m3		HFM Dramix 45/50		HFM Dramix 65/60	
Cemento	300	Cemento	300	Cemento	300	Cemento	300
Agua total	182	Agua total	182	Agua total	182	Agua total	182
Árido (12/20)	587,6	Árido (12/20)	587,6	Árido (12/20)	587,6	Árido (12/20)	587,6
Árido (6/12)	316,4	Árido (6/12)	316,4	Árido (6/12)	316,4	Árido (6/12)	316,4
Árido fino	904	Árido fino	904	Árido fino	904	Árido fino	904
Fibras sintet BASF MasterFiber 248	5	Fibras sintet BASF MasterFiber 248	10	Fibras metálicas dramix 45/50	20	Fibras metálicas dramix 65/60	30

Tabla 16. Dosificaciones de hormigones con fibras de polipropileno y acero y áridos reciclados mixtos.

AR HFS 248 - 5 kg/m3		AR HFS 248 - 10 kg/m3		AR HFM Dramix 45/50		AR HFM Dramix 65/60	
Cemento	300	Cemento	300	Cemento	300	Cemento	300
Agua total	202,46	Agua total	202,46	Agua total	202,46	Agua total	202,46
Árido (12/20)	293,8	Árido (12/20)	293,8	Árido (12/20)	293,8	Árido (12/20)	293,8
Árido (6/12)	158,2	Árido (6/12)	158,2	Árido (6/12)	158,2	Árido (6/12)	158,2
Árido fino	904	Árido fino	904	Árido fino	904	Árido fino	904
ARM	378,83	ARM	378,83	ARM	378,83	ARM	378,83
Fibras sintet BASF MasterFiber 248	5	Fibras sintet BASF MasterFiber 248	10	Fibras metálicas dramix 45/50	20	Fibras metálicas dramix 65/60	30

3.4. Metodología

3.4.1. Fabricación del hormigón

Todos los procesos realizados en este estudio se han llevado a cabo en las instalaciones del instituto de ciencia y tecnología del hormigón (Edificio 4N) y los las instalaciones del edificio 4F, en la Universidad Politécnica de Valencia. Se emplearon dos amasadoras diferentes según las cantidades de hormigón realizadas, una amasadora de tren planetario de capacidad máxima recomendada 100 l, la cual estaba situada en el exterior del edificio 4F; y otra amasadora de

cuba giratoria, más pequeña, de 40 l de capacidad máxima recomendada, situada en el interior del edificio 4F.

Todas las dosificaciones se llevaron a cabo de forma manual en el interior del edificio 4F. La arena empleada estaba almacenada en contenedores y los áridos tradicionales en silos. No obstante, tanto el hormigón como los áridos reciclados mixtos se encontraban en sacas situadas en el sótano del edificio 4N.



Figura 21. Silos y contenedores de áridos (izquierda) y arena (derecha)

Todas las dosificaciones se calculaban previamente, realizando un análisis de la humedad de los áridos para realizar la correspondiente corrección. Primero se preparaban y separaban los componentes en capazos de acuerdo a la cantidad base calculada. Tras esto, se tomaban muestras de los áridos separados en bandejas metálicas, se tomaban datos del peso de la bandeja y los áridos húmedos y se introducían en un horno. Los capazos se cubrían con bolsas de plástico con el fin de mantener constante la humedad del contenido. Tras 24 h se extraían las bandejas del horno y se pesaban de nuevo en la báscula, de esta forma se obtenía el dato de la cantidad de agua que contenían los áridos y se modificaban las cantidades de áridos preparados el día anterior. El siguiente paso era separar la cantidad de aditivo establecida junto a una pequeña cantidad de aditivo auxiliar y el agua de amasado. Por último, se preparaban las probetas cilíndricas, prismáticas y de paneles redondos, tantas como se indica en la tabla del plan de trabajo anterior para cada amasada, lubricándolas con desengrasante y situándolas junto a la amasadora. Con esto y previa preparación de todos los útiles y herramientas para la realización de la amasada y el ensayo de consistencia del hormigón en estado fresco mediante el cono de Abrams, ya se tenía todo listo para realizar las amasadas.



Figura 22. Molde de panel redondo (izquierda) y báscula para dosificar elementos empleada (derecha)

Una vez preparados todos los componentes y las herramientas, se procedía a realizar las amasadas. El primer paso era humedecer la amasadora. Tras esto, se vertían en la misma los áridos junto a la mitad de la cantidad del agua. Tras 15 minutos de amasado, en el que los áridos y el agua se mezclaban adecuadamente, se procedía a añadir el cemento y el resto del agua. Cuando la mezcla alcanzaba una homogeneidad adecuada se procedía a añadir poco a poco el aditivo superplastificante. Una vez éste había reaccionado, se añadían las fibras correspondientes (si era el caso), se esperaba a que la mezcla se homogeneizase de nuevo y se vertía el resto del aditivo correspondiente para compensar la pérdida de fluidez sufrida por la adición de fibras.

3.4.2. Fabricación de probetas

Tras la comprobación de consistencia por cono de Abrams, si el resultado es sido satisfactorio, se procede al llenado de los moldes previamente untados con desencofrante. Todas las probetas se han realizado de acuerdo a las especificaciones de formas y dimensiones establecidas en la norma UNE-EN 12390-1 2013 [55].

Para los moldes cilíndricos de dimensiones 150x300 mm se procedió a realizar el llenado en tres tongadas, tras cada una de las cuales se realizaban 25 golpes con barra de compactación para asegurar el correcto llenado de toda la probeta y la eliminación de las burbujas de aire existentes. Una vez llenas las probetas, se procedía a enrasar y nivelar la superficie en contacto con el exterior para evitar problemas futuros con el ensayo de caracterización de compresión.

Los moldes prismáticos de dimensiones 150x150x600mm, se hormigonaron de acuerdo a la normativa UNE-EN 14651:2007 +A1:2008 [49], vertiendo el hormigón en tres fases, comenzando el primer vertido por la parte central, en la cual se vierte la mayor parte del hormigón (el doble aproximadamente) y tras esto las partes laterales. Tras el llenado se procedía al picado del hormigón con la barra de compactación asegurándose de realizar los golpes de manera homogénea en toda la superficie y sin dejar oquedades. Por último se procedía al nivelado y enrasado de la superficie.

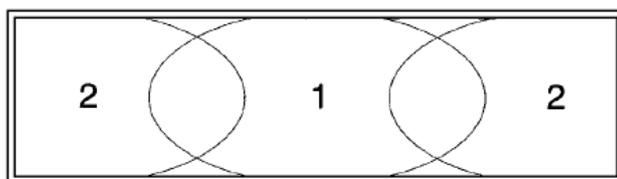


Figura 23. Orden de llenado correcto de una probeta prismática según UNE-EN 14651:2007 +A1:2008 [49]



Figura 24. Moldes prismáticos en proceso de llenado

El molde del panel redondo se llenó en varias tongadas, vertiéndose desde el centro para asegurar un reparto homogéneo del hormigón, tras esto se procedía al vibrado con vibrador eléctrico teniendo en cuenta que no se vibrase en exceso para no orientar de manera inadecuada las fibras. Por último, al igual que con el resto de probetas, se procedía a enrasar y nivelar la superficie, colocando dos garras para facilitar su manipulación en estado endurecido.



Figura 25. Molde de panel redondo con hormigón recién vertido.

3.4.3. Ensayos de caracterización

3.4.3.1. Ensayo de consistencia de hormigón en estado fresco

Una vez finalizado el proceso de amasado, en todas las amasadas se procedía inmediatamente a la realización del ensayo de consistencia del hormigón fresco por el método del cono de Abrams, según la norma UNE-EN 12350-2:2009.



Figura 26. Realización del ensayo de consistencia por cono de Abrams

3.4.3.2. Ensayos de caracterización del hormigón en estado endurecido

En este estudio se han realizado tres tipos de ensayo diferente para la caracterización del hormigón en estado endurecido, los cuales han servido para conocer las propiedades mecánicas de los hormigones empleados en todas las amasadas.

- Determinación de resistencia a compresión en probetas cilíndricas (UNE-EN 12390-3, 2009).
- Determinación de resistencia a tracción por flexión en probetas cúbicas (UNE-EN 14651:2007+A1, 2008).
- Determinación de resistencia a tracción por flexión en paneles redondos cargados en el centro (ASTM C 1550-08).

3.4.3.2.1. Ensayo de resistencia a compresión simple

El ensayo de compresión simple se ha realizado con probetas cilíndricas de diámetro 150mm y 300 mm de altura, de acuerdo a la norma UNE EN 12390 -3.

Al fabricar las probetas en los moldes, la superficie que queda expuesta al aire presenta irregularidades aun intentando enrasarla y nivelarla de la mejor manera posible. Estas irregularidades producen fallos en los ensayos, de manera que se obtienen resultados erróneos. El motivo es que la probeta no apoya en toda su superficie con la plataforma que ejerce la presión, es por eso que previamente al ensayo se deben refrentar todas las probetas cilíndricas en su cara irregular para lograr una superficie de apoyo uniforme.



Figura 27. Máquina de refrentado de probetas cilíndricas con azufre (izquierda) y probetas cilíndricas recién refrentadas (derecha)

El refrentado se debe realizar con azufre tal y como indica la normativa. Al colocar las probetas en el molde con azufre líquido, se deben dar unos golpes en el lado opuesto con maza de goma para asegurarse de expulsar las posibles burbujas de aire o huecos que perjudicarían el resultado del ensayo. Tras el refrentado de las probetas se puede proceder al ensayo de compresión, previa espera de una hora para que el azufre endurezca lo suficiente.



Figura 28. Prensa hidráulica empleada en los ensayos de caracterización de resistencia a compresión en probetas cilíndricas con probeta refrentada y colocada adecuadamente durante la realización del ensayo

El ensayo se realiza de la siguiente forma.

- Se coloca la probeta en la prensa ajustando la cara superior al máximo.
- Se aplica la carga de manera progresiva hasta lograr una velocidad de carga constante y adecuada.
- Se toma el dato de la carga máxima alcanzada antes de la rotura, la cual, tras realizar los ajustes correspondientes, será la resistencia a compresión simple del hormigón.



Figura 29. Probetas cilíndricas recién ensayadas

3.4.3.2.2. Ensayo de resistencia a flexotracción a 3 puntos

Los ensayos de resistencia a flexotracción con probetas prismáticas se han realizado todos de acuerdo a la norma UNE-EN 14651:2007+A1, 2008. Éste ensayo se lleva a cabo con probetas de dimensiones 150 mm x 150 mm x 600 mm. A estas probetas se les debe realizar previamente una entalla en su centro de 25 mm de profundidad para asegurar la situación de la fisura. Asimismo, se han realizado en todas las probetas dos orificios, los cuales se encuentran a 8 cm a cada lado de la entalla central. En estos orificios se colocan las piezas de sujeción de un captador de desplazamiento que sirve para controlar la anchura de la fisura durante el ensayo. Tras esto, se marcan los puntos de apoyo de la probeta y se coloca en la máquina del ensayo de acuerdo a las especificaciones marcadas por la normativa. (figuras 30 y 31)



Figura 30. Probetas prismáticas preparadas para ser ensayadas

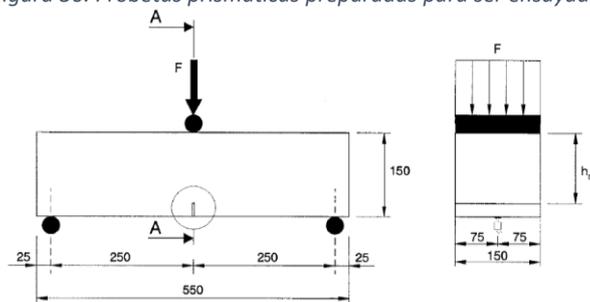


Figura 31. Detalle de preparación de probeta prismática para la realización del ensayo de flexotracción a tres puntos. [49]

Tras conectar el equipo y el captador se procede a la realización del ensayo. El primer paso es aplicar una precarga manual hasta alcanzar una carga entre 0.5 y 1 KN. Esto se hace para evitar un tiempo de ensayo excesivo. Tras esto, se programa una velocidad de carga constante de 0.05 mm/min hasta que la fisura alcanza una apertura de 0.5 mm, lo cual suele coincidir con el momento de aparición de la primera fisura, dependiendo de la cantidad de fibras que contenga la probeta y, sobretodo, su distribución. A partir de este momento se cambia la velocidad de carga a 0.2 mm/min hasta alcanzar una apertura de fisura de 4 mm, momento en el que finaliza el ensayo.



Figura 32. Realización del ensayo de flexotracción a tres puntos (izquierda) y fisura producida por rotura en probeta (derecha)

Tras la realización del ensayo se obtienen los datos de carga máxima resistida y los datos de resistencia residual por flexión, de acuerdo con la normativa y utilizando los datos obtenidos del equipo y la gráfica de apertura de fisura obtenidos.

3.4.3.2.3. Ensayo de resistencia a flexotracción con Round Panel según ASTM C 1550-08

Según varios estudios realizados, los ensayos realizados tradicionalmente carecen de un área de rotura suficiente para dar resultados válidos, ya que por ejemplo, los ensayos de hormigones con fibras a flexotracción en vigas dan resultados con una gran dispersión. Asimismo, el empleo de placas rectangulares supone una mala distribución de las tensiones por las irregularidades geométricas que presenta. La solución a este tipo de problemas pasa por emplear elementos con una geometría regular y un área de rotura lo suficientemente grande como para evitar problemas de dispersión de resultados. Es aquí donde entra en escena la placa circular “Round Panel” que propone la ASTM C 1550-08 [48], la cual asegura una distancia entre la aplicación de la carga y los extremos de la misma equidistante, de forma que las tensiones internas se distribuyen de forma muy uniforme.

En el presente estudio se ha llevado a cabo una extensa campaña de ensayos de Round Panel con todos los tipos de hormigones objeto de estudio. Las dimensiones de las placas y el equipo de ensayo se han preparado de acuerdo a las especificaciones recogidas en la ASTM C 1550-08 [48], adaptadas a las herramientas e instalaciones disponibles en el laboratorio.

Se ha colocado una prensa hidráulica en un pórtico de acero anclado a la estructura del forjado técnico entre la planta baja del ICITECH y el sótano. Esta prensa aplica una carga puntual en el centro de las placas, las cuales se apoyan sobre un soporte formado por tres pivotes con esferas metálicas y plataformas con hendiduras que quedan en contacto con la placa. Bajo las placas a estudiar han colocado captadores de desplazamiento justo en el centro de las mismas para medir la deformación producida durante la aplicación de la carga en el momento del ensayo.

Antes del ensayo se debe medir el diámetro de la probeta en los apoyos para determinar el diámetro medio. Si este es menor que 790 mm o mayor que 810 mm se debe descartar la placa. Afortunadamente en el presente estudio no ha surgido ningún problema con el diámetro en ninguna de las placas estudiadas.

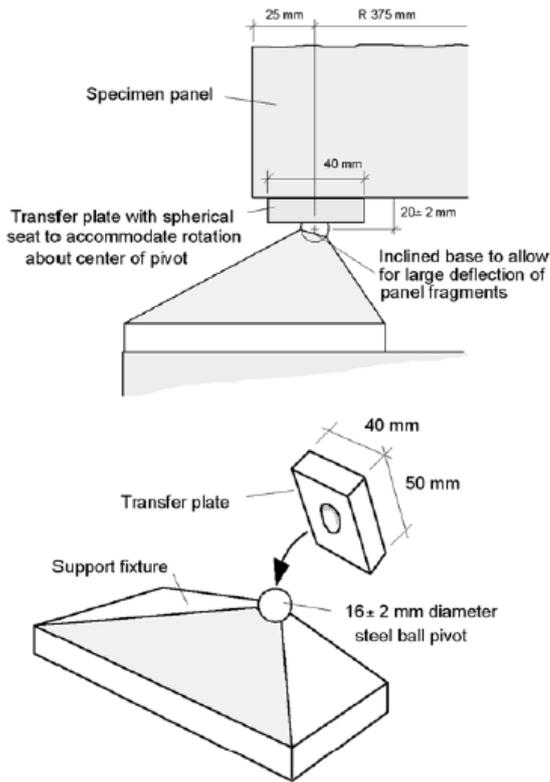


FIG. 2 Detail of Transfer Plate and Pivot Support

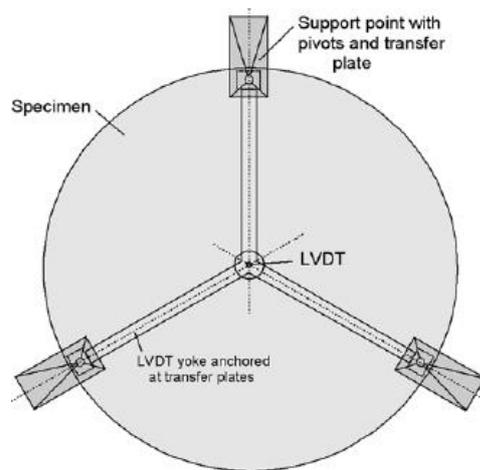


FIG. A1.4 Plan View of Suggested Method of Deflection Measurement

Figura 33. Sistema de ensayo de panel redondo propuesto por la ASTM C 1550-08 [48]

La carga se ha aplicado con prensa hidráulica, aplicando la velocidad de carga de forma manual y monitorizando los datos mediante un ordenador portátil. El ensayo finaliza cuando la placa alcanza una deformación en el centro o flecha de 40 mm. Al finalizar el ensayo, se retiraban las placas con el puente grúa, con la ventaja de que éstas no se rompen por el hecho de llevar fibras en una cantidad suficiente para resistir pese a la deformación sufrida. Tras esto se dejaban en suspensión a unos centímetros del suelo y se rompían totalmente aplicando golpes con un pie de cabra. El siguiente paso era medir el espesor de la placa en tres puntos de cada una de las superficies agrietadas y en el centro, de forma que se obtenían 10 medidas con las cuales se calculaba el valor medio. Con todos los datos obtenidos se ha calculado la energía absorbida de cada muestra, realizando las correcciones que marca la ASTM C 1550-08 [48] mediante la siguiente fórmula.

$$W = W' \left(\frac{t_0}{t} \right)^\beta \left(\frac{d_0}{d} \right), \text{ donde, } \beta = 2.0 - \frac{\delta - 0.5}{80}$$

W = energía absorbida corregida:

W' =energía absorbida obtenida en el ensayo.

t = Espesor medio de la pieza después del ensayo (medido en las caras de rotura).

t₀ =Espesor nominal de la pieza.

Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico.

d = Diámetro medio de la pieza antes del ensayo (medido en los apoyos).

d_0 = Diámetro nominal de la pieza.

D = Deformación a la que se mide la energía absorbida.



Figura 34. Ensayo de un panel redondo

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentaran los resultados de los ensayos descritos anteriormente en el apartado de programa experimental y metodología. Los resultados a analizar trataran tanto los realizados al hormigón fresco como al hormigón endurecido. Como se ha mostrado en el apartado anterior, en este estudio se han realizado varios tipos de ensayos. En cuanto a ensayos del hormigón en estado fresco se ha realizado la prueba de consistencia de cono de Abrams. En estado endurecido, se han realizado diversos tipos de ensayos. Como se expuso en el programa experimental, algunos ensayos no se han realizado en todas las fases de este proyecto, como por ejemplo el ensayo del panel redondo de la ASTM C 1550-08, el cual es el que centra más interés de este proyecto. Los ensayos realizados en el hormigón en estado endurecido han sido por tanto, el ensayo de resistencia a compresión simple según la norma UNE-EN 12390-3:2009, el ensayo de flexotracción a tres puntos según la norma UNE-EN 14651 y por último, el ensayo de resistencia a flexotracción con paneles redondos según la norma ASTM C 1550-08. En este apartado no se tratarán los resultados obtenidos en los ensayos realizados a los áridos mixtos reciclados debido a que ya se han expuesto y comentado en el bloque anterior.

En todos los tipos de ensayos se procederá de la misma manera, primero se expondrán los resultados obtenidos, ya sea en gráficos o en tablas, y posteriormente se realizará una explicación de los mismos, analizando el efecto que ha provocado la adición/sustitución de los diferentes tipos de fibras y áridos reciclados mixtos en la matriz del hormigón de cada amasada. Por último, se realizará una comparación más general entre las amasadas de un mismo tipo de hormigón.

4.1. Ensayo de consistencia del hormigón en estado fresco por cono de Abrams

La realización de éste ensayo se ha llevado a cabo en todas las amasadas realizadas. Al terminar el proceso de amasado se rellenaba un primer capazo y se vertía en el cono previamente preparado junto al lugar de amasado. Si la consistencia entraba dentro de la normalidad se procedía a rellenar los moldes de las probetas a ensayar, si no, se debía continuar amasando hasta conseguir una consistencia adecuada mediante el aumento de aditivo si procedía. Cabe destacar que en ninguna de las amasadas fue necesario este hecho, ya que los resultados de consistencia obtenidos por todas entraban dentro de unos márgenes de aceptación establecidos previamente (entre 10 y 20 cm). La tabla 17 muestra los resultados de consistencia obtenidos en todas las amasadas realizadas durante éste estudio.

Tabla 17. Resultados de consistencia obtenidos en todas las amasadas realizadas por cono de Abrams

Nº	Fecha	Tipo de hormigón	Cono	% Aditivo empleado
1	26/11/2015	HC - 1	15	0,50%
2	26/11/2015	HC - 2	16	0,60%
3	20/01/2016	FP 5 kg	10	0,70%
4	28/01/2016	FP 10 kg	16	1,39%
5	04/02/2016	FA 45/50 20 kg	14,5	1,40%
6	12/02/2016	FA 65/60 30 kg	19	1,40%
7	26/02/2016	FP 5 kg	18	1,65%
8	01/03/2016	FP 5 kg	19	1,49%
9	09/03/2016	FP 10 kg	11,5	1,64%
10	09/03/2016	FP 10 kg	15	1,70%
11	11/03/2016	FA 45/50 20 kg	19	1,53%
12	15/03/2016	FA 45/50 20 kg	20	1,30%
13	21/03/2016	FA 65/60 30 kg	20	1,40%
14	21/03/2016	FA 65/60 30 kg	20	1,40%
15	23/03/2016	HC - 2	15	0,80%
16	08/04/2016	AR HC	14,5	0,93%
17	13/04/2016	AR FP 5 kg	16	1,40%
18	13/04/2016	AR FP 10 kg	15	1,40%
19	14/04/2016	AR FA 45/50 20 kg	15,5	1,21%
20	14/04/2016	AR FA 45/50 20 kg	18,5	1,40%
21	19/04/2016	AR FA 65/60 30 kg	16,5	1,12%
22	19/04/2016	AR FA 65/60 30 kg	17	1,12%
23	22/04/2016	AR FP 10 kg	13,5	1,40%

Los resultados de consistencia de las amasadas están comprendidos entre 10 y 20 cm. Esta diferencia, a priori, puede parecer algo extensa, no obstante, no debemos olvidar que se han estudiado hormigones con tipos y cantidades de fibras muy dispares. Asimismo, podemos observar como la cantidad de aditivo empleado ha sido diferente en cada amasada en función de las necesidades de cada dosificación. Es por ello que en las amasadas correspondientes a hormigones de control se empleó una cantidad de aditivo entre el 0.50 y el 0.90 % del peso del cemento, mientras que el empleo de fibras hizo requerir mayor cantidad del mismo para combatir la pérdida de trabajabilidad que estas producían. La decisión de aumentar la cantidad de aditivo se presentó en la amasada nº 3, cuando se emplearon por primera vez fibras. En ésta amasada, incluso aumentando la cantidad de aditivo un 0.1%, la pérdida de trabajabilidad fue excesiva, obteniéndose un resultado de cono de Abrams de 10 cm. Es por eso que a partir de esa amasada, se asignó una base de 1.4% de cantidad de aditivo en todas las amasadas que empleasen fibras, modificando ésta cantidad durante el proceso de amasado según las necesidades y el criterio propio. En caso de necesitar más aditivo que el establecido de 1.4%, se ha preparado en todas las amasadas una dosis extra de aditivo en un recipiente separado. Al no ser la realización del hormigón una ciencia exacta, siempre es conveniente prepararse ante posibles contratiempos aunque se crea que se tiene todo calculado y controlado. Siempre puede surgir algún problema no previsto y de origen desconocido. Éste es el caso de amasadas como por ejemplo, la 11 y la 12, en las cuales empleando una dosificación idéntica, precisaron una cantidad de aditivo muy dispar para obtener una consistencia similar. Es en estos casos donde

entran factores como el clima o el tiempo de amasado, ya que la única diferencia entre las dos amasadas fue que una se realizó cuatro días más tarde.

Pese a la variabilidad de los resultados, no se han obtenido diferencias suficientes para considerarlas importantes, ya que este tipo de desajustes cuando se emplean tipos diferentes de hormigones se da a menudo y entran dentro de la normalidad. Hay que destacar que en una de las amasadas realizadas, la cual no se muestra en la tabla ni se ha llegado a estudiar, surgieron problemas con la dosificación y se obtuvo un hormigón excesivamente seco. Esta amasada se descartó inmediatamente y se achacó el problema a un fallo durante la dosificación y separación de los componentes, el cual no se volvió a dar a lo largo de las siguientes amasadas.

4.2. Ensayo de resistencia a compresión simple en probetas cilíndricas según UNE-EN 12390-3:2009

Como se ha visto en el apartado del programa experimental, el ensayo de resistencia a compresión simple es el único que se ha realizado en todas las amasadas realizadas. Los resultados obtenidos tras ensayar las probetas cilíndricas normalizadas mediante prensa hidráulica se muestran y comentan a continuación. En la figura 50 podemos observar los resultados de resistencia a compresión a 7 y 28 días de los hormigones de control realizados en la primera amasada.

Tabla 18. Resultados de resistencia a compresión a 7 y 28 días de los hormigones de control

Compresión a 7 días		
Hormigón	HC-1	HC-2
Amasada	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)
I	31,60	31,30
	33,00	32,20
	32,20	31,90
Promedio	32,27	31,80
Compresión a 28 días		
Hormigón	HC-1	HC-2
Amasada	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)
I	39,90	36,60
	38,30	37,20
	35,50	39,40
Promedio	37,90	37,73

Los ensayos transcurrieron con normalidad, obteniéndose resultados muy similares en ambas amasadas. Finalmente, se optó por emplear la dosificación del HC-2 debido a que con la cantidad de áridos empleados en ella se obtenía una mezcla más homogénea, cosa que podía evitar problemas futuros con la adición de fibras.

Tabla 19. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 28 días de las amasadas de la fase 2.1

PROBETAS	FIBRAS DE POLIPROPILENO BASF 248		F. METÁLICAS 45/50	F. METÁLICAS 65/60
	5 KG	10 KG	20 KG	30 KG
	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)
1	18,60	41,60	44,90	27,20
2	29,10	42,20	46,30	29,90
3	47,70	34,40	45,20	28,80
4	40,50	43,54	47,10	29,90
Promedio	44,10	40,43	45,88	28,95

En algunos de los ensayos se obtuvieron resultados extraños, los cuales no fueron aceptados y no se tuvieron en cuenta, achacándose a un problema con el refrentado de las probetas. Éste es el caso de la amasada 3 y 4 (FP 5 y 10 kg), no obstante, todos los resultados obtenidos en la amasada 6 (FM 30kg) son inferiores a lo que deberían, presentando unos valores entre 19 y 22 MPa, frente a los 35-38 esperados. Pese a estos resultados negativos, en el ensayo de flexotracción a 3 puntos se han obtenido resultados normales, por lo que no se ha descartado la amasada. La tabla 20 muestra los resultados obtenidos en las amasadas comprendidas entre la 7 y la 14.

Tabla 20. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 28 días de las amasadas de la fase 2.2

PROBETAS	FIBRAS DE POLIPROPILENO BASF 248		F. METÁLICAS 45/50	F. METÁLICAS 65/60
	5 KG	10 KG	20 KG	30 KG
	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)
5	42,70	50,20	45,50	45,00
6	43,30	51,00	47,70	46,00
7	48,80	48,80	45,50	48,00
8	49,10	50,20	46,60	48,00
Promedio	45,98	50,05	46,33	46,75

En estos ensayos, a diferencia de los realizados en la fase anterior, no se ha obtenido ningún resultado extraño, siendo todos muy homogéneos y comprendidos entre 38 y 42. Estos resultados son superiores a los obtenidos en las amasadas de hormigón de control, los cuales rondaban los 30 MPa, pese a que a priori, el empleo de fibras no debería aumentar la resistencia a compresión del hormigón de forma significativa. Los resultados obtenidos en las amasadas de esta fase son similares a los obtenidos en la fase anterior entre los mismos tipos de hormigones, excepto, las de FP 30 kg y por supuesto, las que contienen 30 kg de FM 65/60. No obstante, en el primer caso, los resultados no son preocupantes, pero en el segundo caso se aceptarán como válidos los obtenidos en la fase nº 3. Otro dato a destacar es la diferencia de resultados entre las dos amasadas de FP 5kg, aunque se considera que esta diferencia no es suficientemente grande como para considerarla fuera de la normalidad. De cualquier modo, en todas las amasadas de ésta fase se destaca y valora positivamente la homogeneidad de los resultados en

general. En la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos en las amasadas de comparación entre el HC empleado hasta el momento y el HC – AR, el cual lleva una sustitución parcial del 50% de áridos reciclados mixtos.

Tabla 21. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 28 días de las probetas de hormigón de control y de hormigón de control con áridos reciclados

PROBETAS	HORMIGÓN DE CONTROL	
	HC	HC - AR
	fcm (Mpa)	fcm (Mpa)
1	51,60	45,50
2	52,10	44,40
3	51,00	44,40
4	52,70	
Promedio	51,85	44,77

Éstos resultados presentan un gran dilema, ya que son muy superiores a los obtenidos en el primer hormigón de control realizado. No obstante, es un resultado más cercano a los obtenidos en las amasadas que contienen fibras. Esto dejaría claro que el aumento de resistencia sufrido en las amasadas de hormigón con fibras no se debía a la acción de las mismas en el hormigón, sino a otros factores. El motivo de la gran diferencia entre la primera amasada de HC y el resto no está claro al 100%, pero existen una serie de diferencias que pueden ser su causa. Por una parte, como se puede apreciar en la figura 53, la primera amasada de HC se realizó mucho antes que el resto. Las diferencias climáticas y el hecho de que los materiales empleados pudieran haber sufrido alguna modificación durante ese periodo o provengan de sacas/lotés distintos, puede afectar a la calidad del hormigón y por tanto a los resultados. Otro de los motivos puede ser el cambio de amasadora. La primera amasada de HC se realizó en una amasadora diferente a las demás, la cual era más pequeña y menos potente que la empleada con el resto de amasadas. Por último, otro de los posibles motivos, es que se pudiese haber cometido algún error durante la realización de la primera amasada, debido a que, al ser la primera, se carecía de la experiencia que sí se tenía en el momento de la realización de las demás. Centrándonos en la comparación entre el HC y el HC-AR, se aprecia una reducción de resistencia con el empleo de áridos reciclados, lo cual entraba dentro de las previsiones.

La figura 54 presenta los resultados obtenidos en las amasadas correspondientes a la fase 4. Excepto en la amasada con FP-5kg, se presenta una ligera reducción de la resistencia frente a los datos obtenidos con las probetas realizadas con hormigón tradicional.

Tabla 22. Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 28 días de las amasadas de la fase 3

PROBETAS	FIBRAS DE POLIPROPILENO BASF 248		F. METÁLICAS 45/50	F. METÁLICAS 65/60
	AR- 5 KG	AR- 10 KG	AR- 20 KG	AR- 30 KG
	fc _m (Mpa)	fc _m (Mpa)	fc _m (Mpa)	fc _m (Mpa)
1	50,20	46,00	37,20	25,50
2	51,00	44,00	46,00	24,40
3		40,50	44,60	26,60
4		42,20	48,00	26,10
Promedio	50,60	43,18	43,95	25,65

El punto más importante a destacar es la gran reducción de resistencia de la amasada con FM 30kg de nuevo. Pese a que en una de las fases no ha habido problema con este tipo de hormigón, el hecho de que haya habido un descenso en la resistencia a compresión tan importante en tres ocasiones, es preocupante y debe ser objeto de estudio.

4.3. Ensayo de resistencia a flexotracción a tres puntos en probetas prismáticas según UNE-EN 14651

Uno de los grandes objetivos de este estudio, como se ha comentado anteriormente, es el de ver la relación entre los resultados del ensayo a flexotracción a tres puntos y los del ensayo con paneles redondos. Es por ello que, pese a que la parte principal de este estudio consiste en el estudio de paneles redondos, se han realizado numerosos ensayos a probetas prismáticas.

En este punto se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a flexotracción a tres puntos con probetas prismáticas. Estos resultados se presentarán de forma diferente a los anteriores, ya que en lugar de presentarse por fases, se presentarán por tipo de hormigón empleado. Esto facilitará la comparación entre los hormigones con la misma dosificación, ayudando a comprender el efecto que han provocado las fibras empleadas en el hormigón. Asimismo, las probetas se numeran por su orden de realización de ensayo, siendo la probeta nº 1 la primera en ensayarse de su tipo y así sucesivamente.

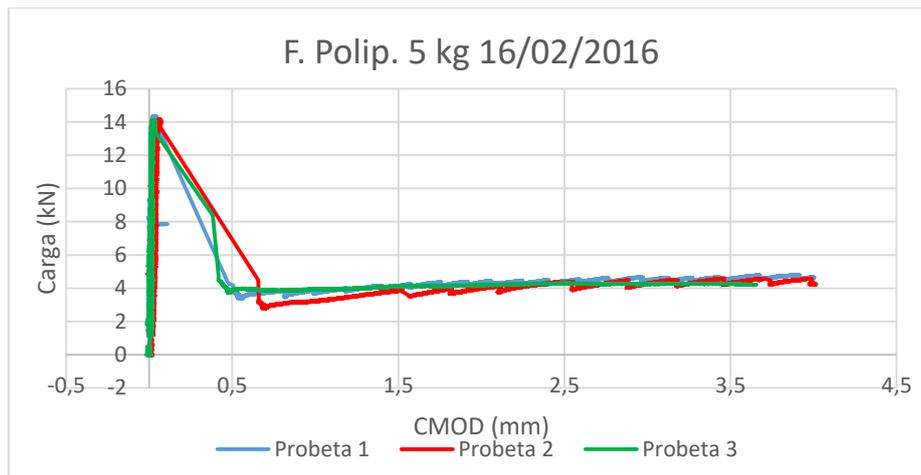


Figura 35. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-5kg (1ª a 4ª)

Tabla 23. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-5kg (1ª a 4ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	4,59	1,37	1,31	1,41	1,46
2	4,53	1,01	1,24	1,40	1,38
3	4,52	1,24	1,32	1,37	1,37
4	9,80	2,73	8,10	1,05	1,19
Media	4,54	1,21	1,29	1,39	1,40
Rango	0,90	1,08	2,29	0,27	0,20

En primera fase de ensayos en probetas con FP 5 kg se ensayaron cuatro probetas prismáticas, no obstante, durante el ensayo de la probeta nº 4 surgieron problemas, de manera que se alcanzaron valores exageradamente elevados en la fase intermedia del ensayo. El hecho de haber ensayado numerosas probetas y tener muchos resultados, permite poder descartar probetas con este tipo de errores. Esta probeta no se ha incluido en la gráfica y no se ha tenido en cuenta para compararla con las demás.

Centrándonos en las tres probetas restantes, podemos apreciar que se han obtenido unos resultados muy homogéneos, alcanzando resistencias máximas antes de rotura alrededor de los 4,50 MPa. Tras la rotura, se conservan resistencias de 1,20 MPa, observándose una ligera recuperación de la misma de manera progresiva, llegándose a alcanzar los 1,40 MPa para una deformación de 3,5 mm.

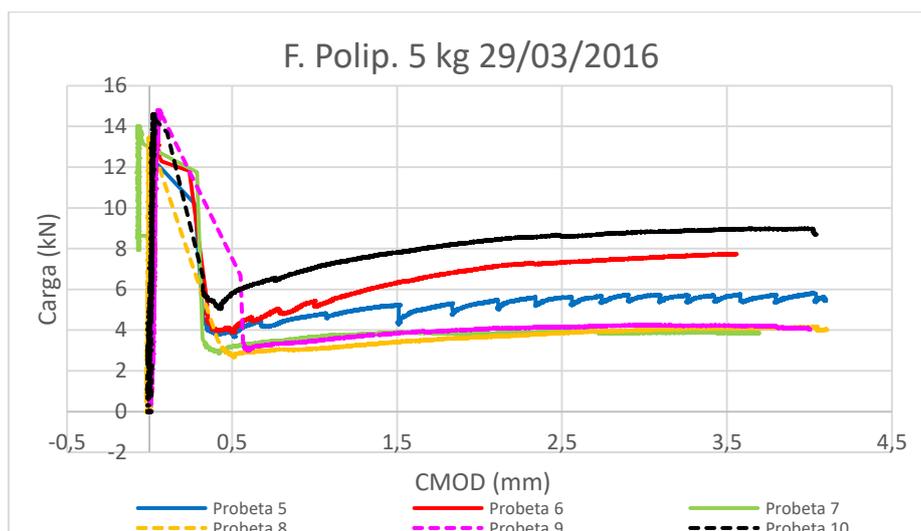


Figura 36. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-5kg (5ª a 10ª)

Tabla 24. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-5kg (5ª a 10ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
5	4,02	1,23	1,68	1,80	1,81
6	4,20	1,25	2,02	2,35	2,47
7	4,48	1,03	1,24	1,25	1,24
8	4,31	0,90	1,10	1,24	1,31
9	4,73	2,14	1,22	1,33	1,35
10	4,67	1,86	2,50	2,75	2,86
Media	4,40	1,40	1,63	1,78	1,84
Rango	0,16	0,89	0,86	0,85	0,88

A diferencia de las primeras probetas de FP 5kg ensayadas, éstas han sufrido una dispersión de resultados mayor. Pese a ello, estas diferencias no son demasiado grandes y se consideran dentro de las previsiones. De hecho, uno de los objetivos de este estudio es el de la demostración de que el ensayo con paneles redondos obtiene dispersiones mucho menores que en el ensayo de flexotracción a tres puntos con probetas prismáticas. Como se puede apreciar, las resistencias alcanzadas esta fase y la anterior son similares.

Otro dato curioso que se puede observar es la gran recuperación de resistencia tras la rotura de las probetas 6 y 10. Esto puede deberse a una colocación y distribución de fibras más favorable en la zona de rotura.

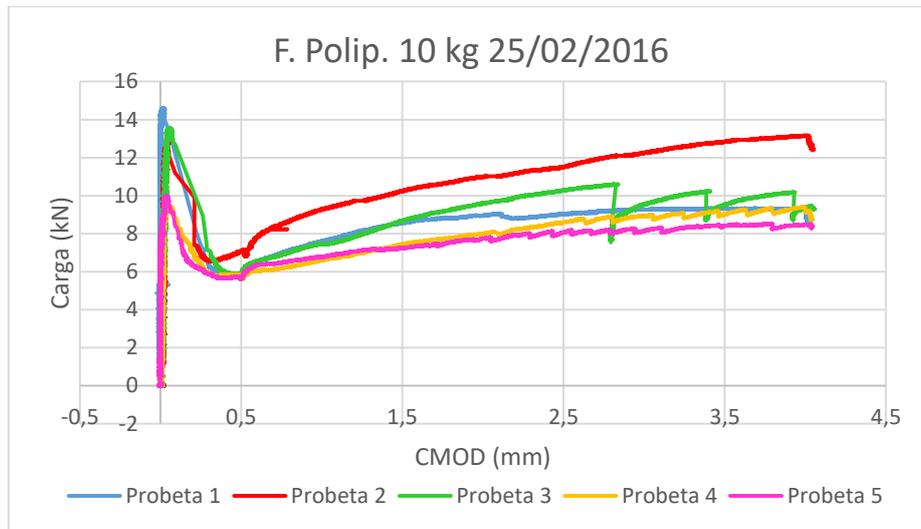


Figura 37. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-10kg (1ª a 5ª)

Tabla 25. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-10kg (1ª a 5ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	4,67	1,87	2,74	2,89	2,98
2	4,09	2,26	3,28	3,69	4,10
3	4,34	1,87	2,78	3,29	3,05
4	3,04	1,86	2,38	2,74	2,88
5	3,20	1,80	2,32	2,57	2,69
Media	3,87	1,93	2,70	3,04	3,14
Rango	0,42	0,24	0,35	0,37	0,45

En los ensayos a probetas con FP 10 kg podemos apreciar un menor descenso de la resistencia tras la rotura y una recuperación de la misma superior al de las probetas con FP 5kg. Asimismo, se puede observar un descenso de la resistencia inicial en dos de las probetas ensayadas (la 4 y la 5), el cual coincide con una menor recuperación de la energía. Esto puede deberse a una distribución de fibras menos favorable en la zona de rotura. Se descarta un problema con la matriz del hormigón, ya que no se han experimentado problemas durante los ensayos a compresión de probetas con el mismo tipo de hormigón.

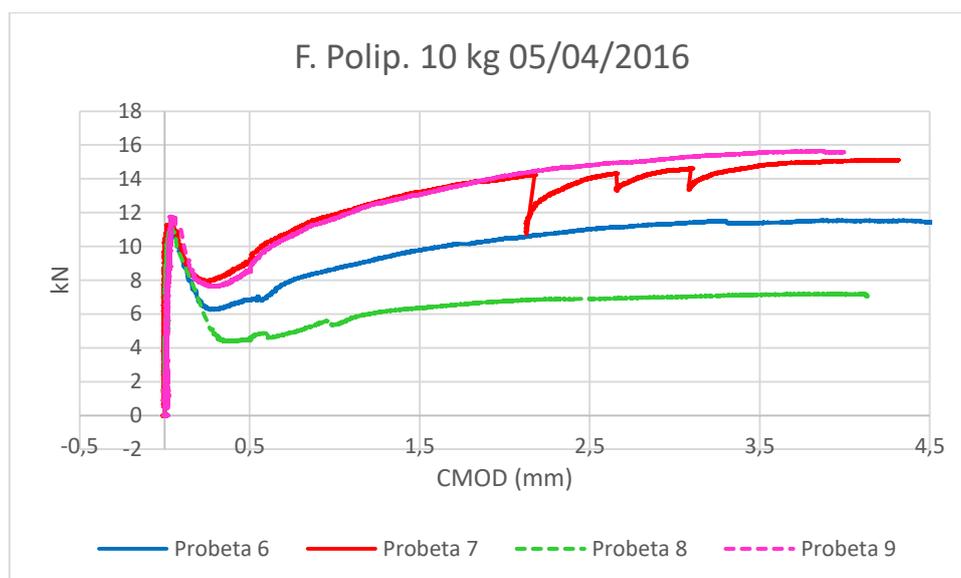


Figura 38. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-10kg (6ª a 9ª)

Tabla 26. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FP-10kg (6ª a 9ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	3,53	2,20	3,13	3,53	3,65
2	3,63	2,91	4,22	4,48	4,73
3	3,54	1,42	2,03	2,20	2,29
4	3,77	2,75	4,18	4,73	4,98
Media	3,62	2,32	3,39	3,74	3,91
Rango	0,07	0,64	0,65	0,68	0,69

Los datos obtenidos en las probetas 6, 7, 8 y 9 son interesantes. Pese a haberse obtenido resistencias a compresión superiores a las de las probetas con el mismo hormigón de la fase anterior, en el ensayo a flexotracción se han obtenido resistencias iniciales inferiores. No obstante, excepto en el caso de la probeta 8, se han experimentado recuperaciones de resistencia tras rotura muy importantes, superando incluso con creces el valor de resistencia antes de rotura. El hecho de que este tipo de hormigón lleve una cantidad de fibras tan importante, hace que la colocación y distribución de las fibras tenga un gran impacto en el resultado final, causando dispersiones de resultados entre probetas del mismo tipo muy altas. El hecho de que el ensayo de flexotracción a tres puntos según la UNE-EN 14651 emplee probetas con áreas de rotura tan pequeñas hace que este hecho tenga un impacto aún mayor.

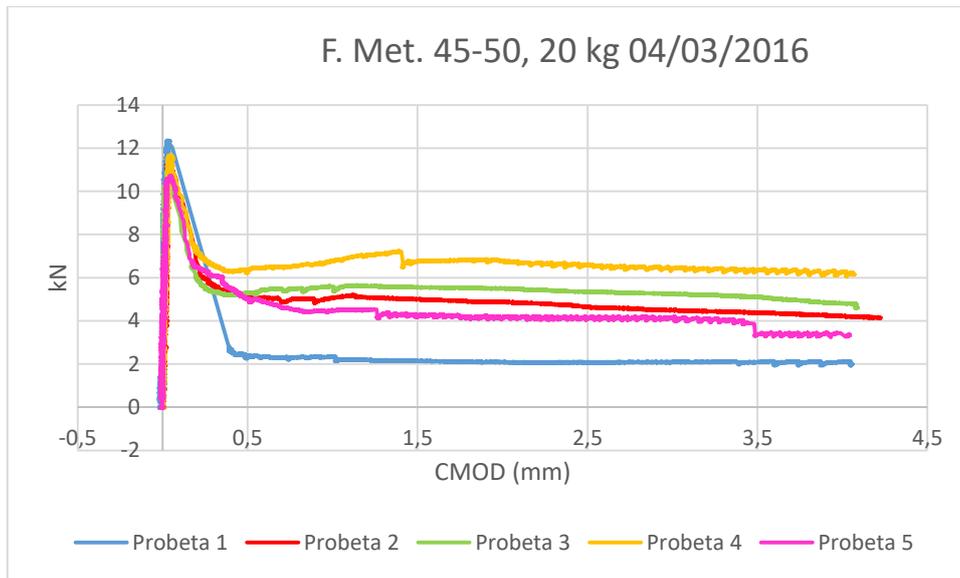


Figura 39. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM45/50(1ª a 5ª)

Tabla 27. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM45/50(1ª a 5ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
5	3,95	0,75	0,68	0,66	0,67
6	3,70	1,64	1,60	1,48	1,40
7	3,54	1,69	1,78	1,71	1,64
8	3,73	2,03	2,16	2,11	2,02
9	3,43	1,61	1,34	1,32	1,08
Media	3,67	1,54	1,51	1,46	1,36
Rango	0,14	0,83	0,98	0,99	0,99

Los resultados de resistencia antes de rotura de las probetas con FM 45/50 de la amasada 5 han sido similares al resto. En cuanto al comportamiento tras primera fisura, se destaca una caída de la carga a la mitad de la carga máxima, excepto con la probeta nº 1, la cual ha descendido en mayor medida. No obstante, una característica en común de las cinco probetas ensayadas es la estabilización de la carga soportada tras la rotura, de manera que esta se mantiene constante con el aumento progresivo de la apertura de fisura.

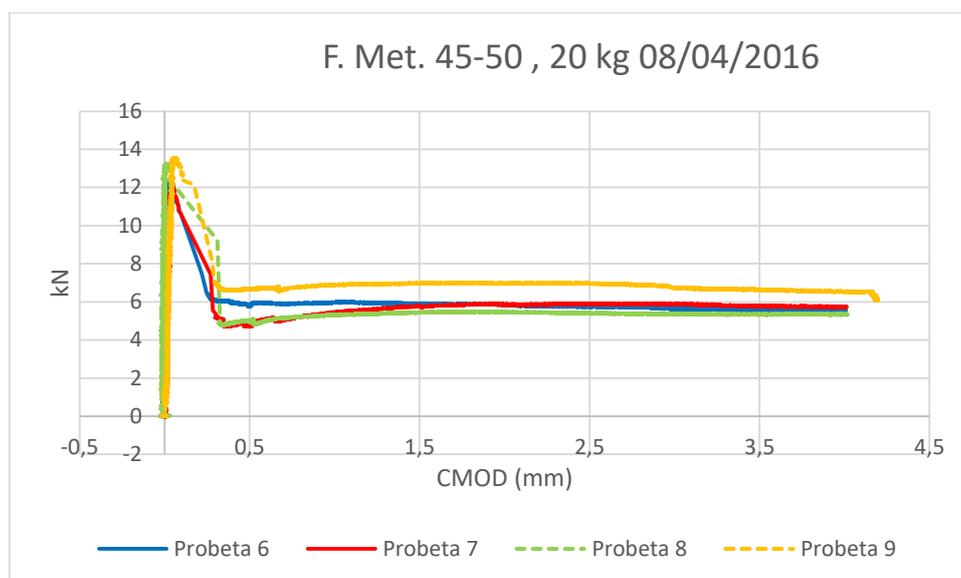


Figura 40. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM45/50(6ª a 9ª)

Tabla 28. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM45/50(6ª a 9ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
6	3,95	1,84	1,89	1,84	1,78
7	3,83	1,51	1,85	1,88	1,85
8	4,23	1,60	1,74	1,74	1,71
9	4,33	2,13	2,23	2,23	2,12
Media	4,09	1,77	1,93	1,92	1,87
Rango	0,12	0,35	0,26	0,26	0,22

En la segunda fase de ensayos a probetas con FM 45/50 se puede apreciar un comportamiento similar a la anterior fase con las mismas fibras. No obstante, en este caso se ha dado una mayor estabilidad tras la rotura, siendo la capacidad de carga incluso más estable que en la anterior fase. De igual modo, se ha obtenido una menor dispersión de resultados entre probetas.

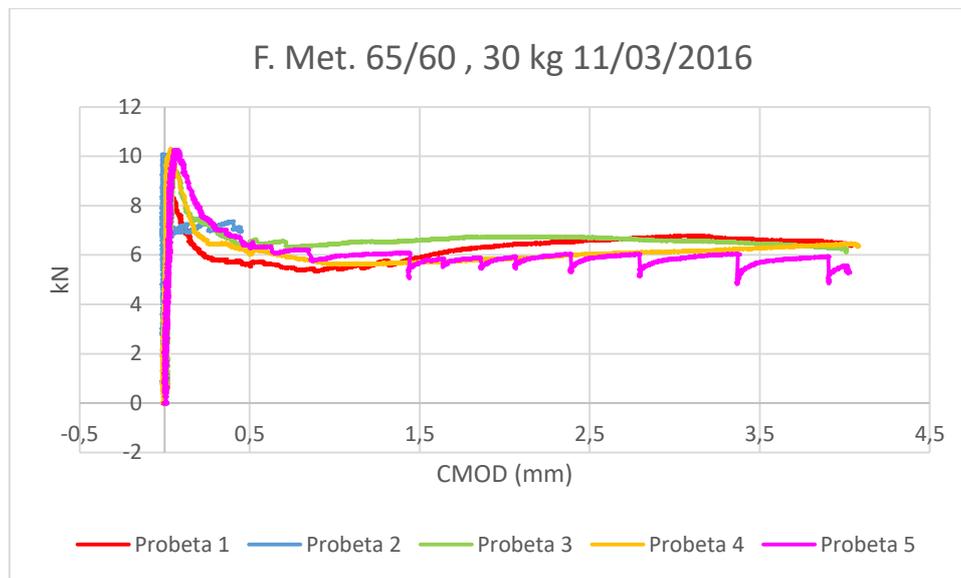


Figura 41. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM65/60(1ª a 5ª)

Tabla 29. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM65/60(1ª a 5ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	2,72	1,81	1,89	2,11	2,11
2	3,23	2,22	-	-	-
3	3,02	2,04	2,11	2,15	2,06
4	3,30	1,97	1,83	1,93	2,01
5	3,29	2,04	1,82	1,88	1,82
Media	3,11	2,02	1,91	2,02	2,00
Rango	0,19	0,20	0,15	0,13	0,15

Con el empleo de FM 65/60 se ha sufrido una menor caída de la resistencia tras rotura que con el empleo de FM 45/50. Asimismo, se aprecia una leve recuperación de la resistencia, alcanzando la recuperación máxima sobre los 2.5 mm de apertura de fisura, para luego volver a una tendencia negativa muy suave. Hay que destacar que esta mejoría respecto a las amasadas con FM 45/50 puede deberse a que se ha empleado una mayor cantidad de las mismas por m³, ya que se ha empleado 30 kg/m³ frente a los 20 kg/m³ de las amasadas con FM 45/50. El análisis a flexotracción del hormigón empleado en estas probetas confirma la pérdida de resistencia frente al resto de amasadas que se observó en la prueba de resistencia a compresión. No obstante, la caída de resistencias ha sido proporcionalmente menor a flexotracción que a compresión.

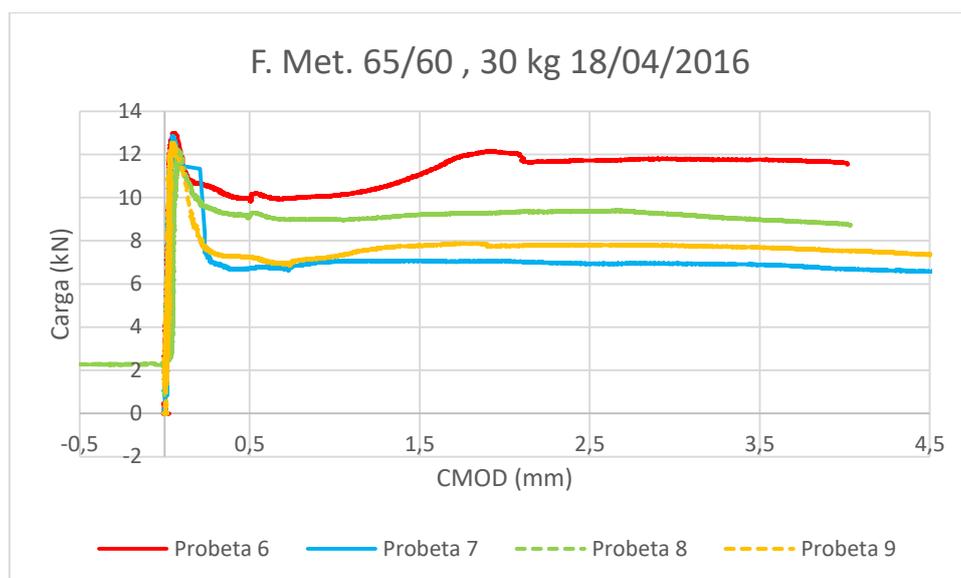


Figura 42. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM65/60(6ª a 9ª)

Tabla 30. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con FM65/60(6ª a 9ª)

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
6	4,16	3,19	3,54	3,75	3,76
7	4,11	2,15	2,27	2,22	2,20
8	3,90	2,93	2,95	2,99	2,87
9	4,01	2,32	2,48	2,49	2,46
Media	4,05	2,65	2,81	2,86	2,82
Rango	0,06	0,39	0,45	0,54	0,55

En la segunda fase de ensayos a probetas de FM 65/60 se han obtenido tendencias similares a la anterior. No obstante, en las probetas 6 y 8 se han obtenido resultados muy positivos, ya que la pérdida de resistencia tras rotura ha sido muy leve. Asimismo, la probeta nº6 ha alcanzado una recuperación muy cercana a la carga máxima antes de la primera fisura. Estos hechos pueden explicarse con una orientación y distribución de fibras más favorable que el resto de probetas.

La figura 44 muestra las resistencias máximas antes de rotura alcanzadas por las probetas con hormigón de control. Como puede apreciarse, se han alcanzado valores de resistencia superiores a la media. Este hecho era de esperar, ya que en el ensayo a compresión se alcanzaron resistencias muy altas.

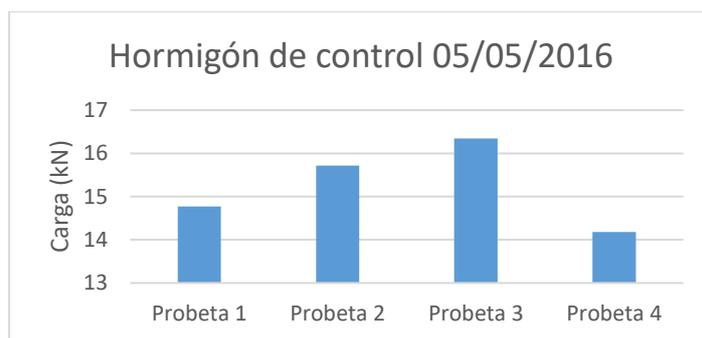


Figura 43. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con HC

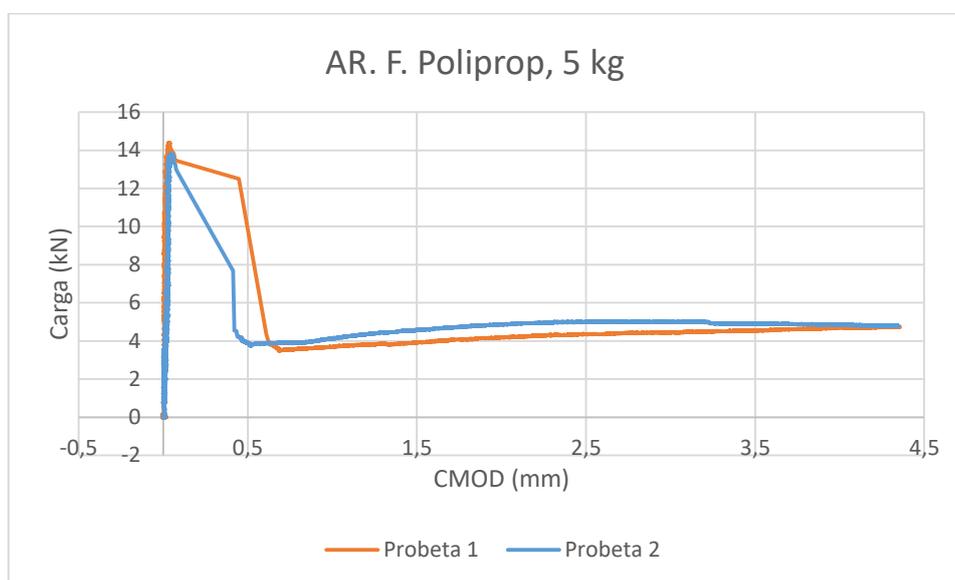


Figura 44. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FP-5kg

Tabla 31. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FP-5kg

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	4,61	4,00	1,25	1,39	1,46
2	4,42	1,25	1,47	1,60	1,57
Media	4,51	2,62	1,36	1,50	1,51
Rango	0,04	1,05	0,16	0,14	0,07

En las figuras 72 y 73 se observan los resultados de resistencia a flexotracción obtenidos al ensayar probetas con AR-FP-5kg. Se puede apreciar que las resistencias máximas alcanzadas son muy elevadas. Tras la rotura, las caídas de resistencia son elevadas, no obstante, estas experimentan una leve recuperación progresiva.

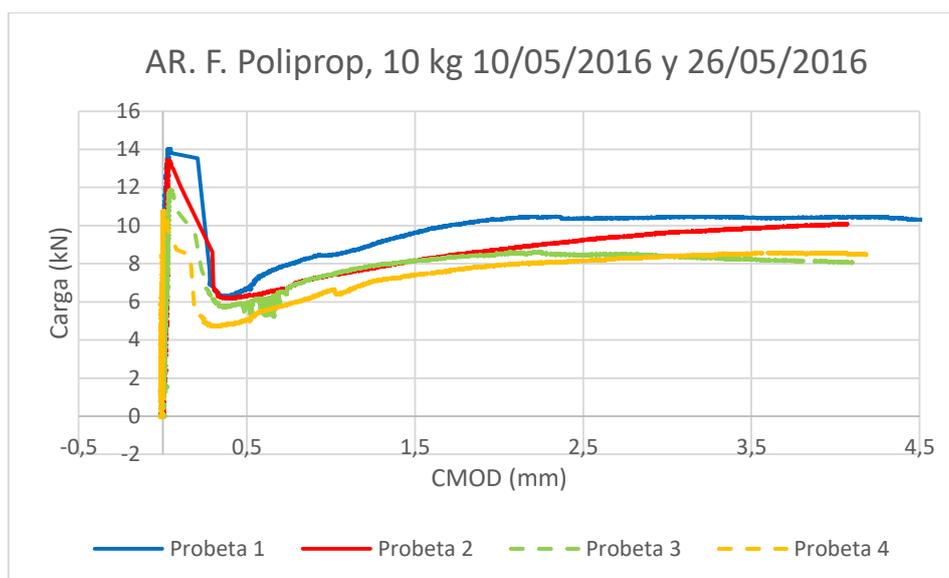


Figura 45. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FP-10kg

Tabla 32. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FP-10kg

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	4,49	2,15	3,09	3,33	3,33
2	4,30	2,02	2,62	2,97	3,16
3	3,79	1,89	2,61	2,70	2,63
4	3,46	1,62	2,37	2,61	2,72
Media	4,01	1,92	2,67	2,90	2,96
Rango	0,26	0,28	0,27	0,25	0,24

Respecto a la amasada con AR-FP-5kg, la primera amasada de AR-FP-10kg presenta una menor reducción de la resistencia tras rotura. Asimismo, se experimenta una alta recuperación progresiva de la capacidad de carga con el aumento de la fisura. En la segunda amasada de AR-FP-10kg se experimentó un comportamiento similar al de la primera amasada. No obstante las resistencias máximas alcanzadas fueron inferiores, lo cual era previsible, dado que ya ocurrió en el ensayo de resistencia a compresión. Esta reducción puede ser debida a la diferente condición climática del día de la amasada o incluso a la heterogeneidad de los áridos reciclados mixtos empleados, ya que al ser tomados de una saca, la zona de la misma donde se extraigan puede significar obtener composiciones diferentes (sobre todo en contenido de finos). No obstante, en este caso, la reducción de resistencia no es suficientemente significativa para ser considerada un problema.

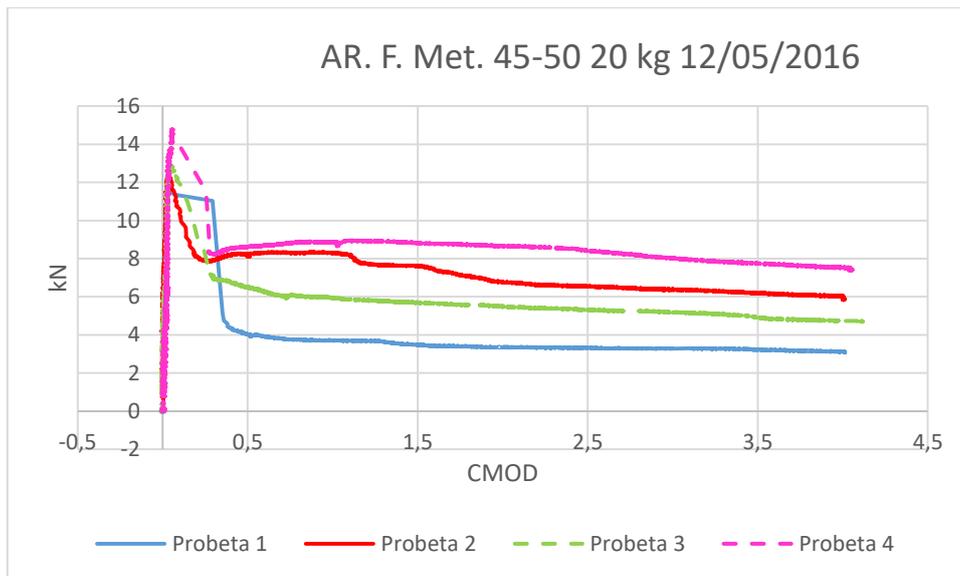


Figura 46. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FM-45/50

Tabla 33. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FM-45/50

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	3,75	1,29	1,12	1,06	1,03
2	3,91	2,61	2,44	2,09	1,99
3	4,13	2,07	1,82	1,71	1,56
4	4,73	2,76	2,82	2,69	2,48
Media	4,13	2,18	2,05	1,89	1,76
Rango	0,24	0,67	0,83	0,87	0,82

El ensayo a probetas con AR-FM-45/50 muestra un comportamiento bastante homogéneo. No obstante, se experimentaron diferencias en la pérdida de resistencia sufrida tras primera fisura bastante significativas entre la probeta nº1 y el resto. Asimismo, la probeta nº4 alcanzó una resistencia antes de primera fisura muy superior al resto. Estas diferencias, no obstante, no son demasiado importantes, ya que muy probablemente obedecen a razones relacionadas con la orientación y distribución de fibras, las cuales son muy difíciles de controlar en elementos de área de rotura tan pequeña.

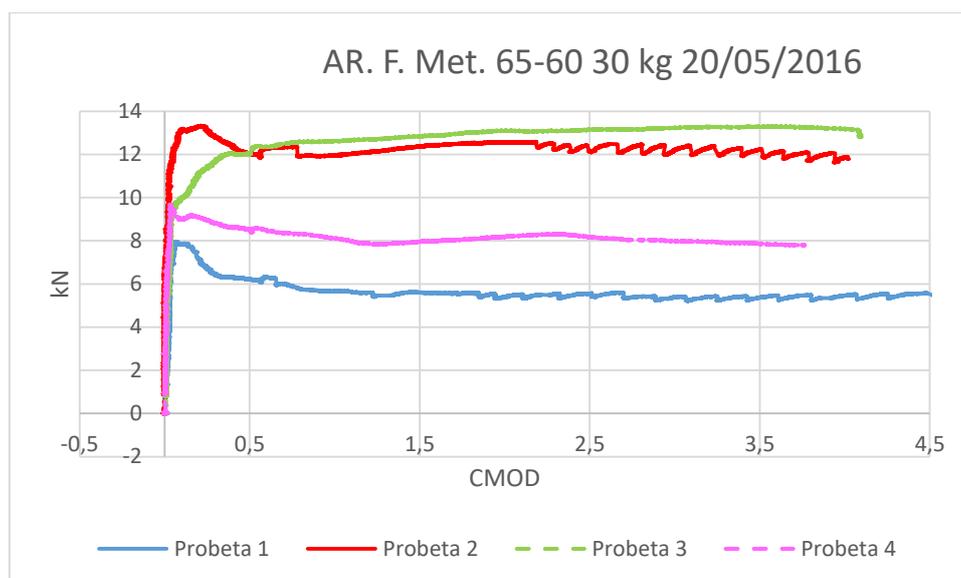


Figura 47. Gráfico carga-deformación del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FM-65/60

Tabla 34. Resultados del ensayo de flexotracción a tres puntos de las probetas con AR-FM-65/60

Probeta	Carga (MPa)				
	FL	fr1	fr2	fr3	fr4
1	2,55	1,99	1,79	1,78	1,72
2	4,27	3,86	3,95	3,89	3,91
3	3,86	3,86	4,11	4,21	4,25
4	3,09	2,72	2,55	2,61	2,51
Media	3,44	3,11	3,10	3,12	3,10
Rango	0,5	0,60	0,75	0,78	0,82

La característica más destacable de los resultados obtenidos al ensayar a flexotracción las probetas con AR-FM-65/60 es la dispersión de resultados entre las dos amasadas. Ambas tienen un comportamiento post-fisura similar (aunque en la probeta 2 y 3 se han conseguido recuperaciones de resistencia mayores), no obstante, se han alcanzado resistencias máximas antes de primera fisura muy dispares. En el ensayo a compresión de probetas con este tipo de hormigón se obtuvieron valores muy bajos de resistencia, pero homogéneos, los cuales no se corresponden con el valor alcanzado en la probeta nº 2. No obstante, hay que destacar que las probetas ensayadas se hicieron en dos amasadas diferentes. La probeta 2 y 3 se realizaron en la misma amasada y la 1 y la 4 en otra. Esto puede haber supuesto la gran diferencia de resultados existentes entre las probetas. Muy probablemente haya habido un error en los tiempos de amasado o durante el vertido que haya producido una mala distribución y orientación de las fibras.

Las figuras 47 y 48 muestra que los valores más bajos de fr1 se han obtenido en las probetas con FP 5kg, no obstante existen diferencias importantes entre algunas amasadas debido probablemente a la colocación y orientación de las fibras. En el resto de amasadas, los resultados de fr1 no son demasiado diferentes. Sí bien es cierto que las amasadas con FM-65/60 han dado valores mayores que el resto.

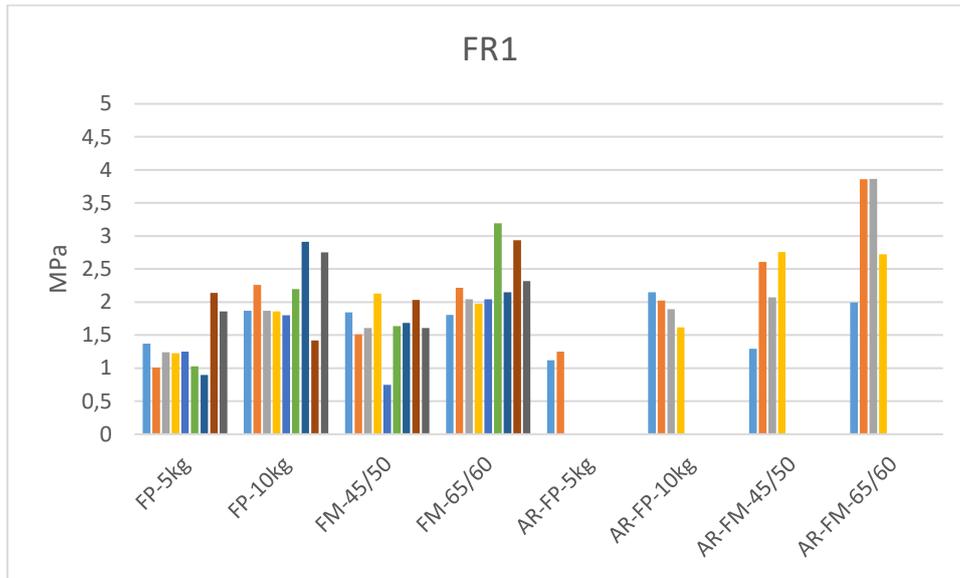


Figura 48. Valores de fr1 de las probetas prismáticas ensayadas a flexotracción

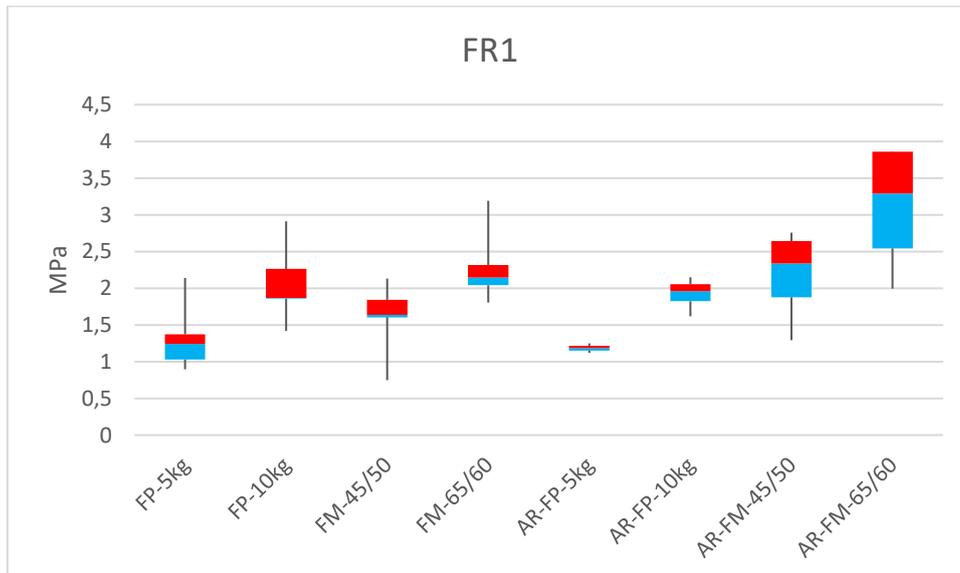


Figura 49. Diagrama de caja de los valores de fr1 de las probetas prismáticas ensayadas a flexotracción

En el caso de los valores de fr3 sí se aprecian diferencias más significativas entre los tipos de fibras empleados. Al igual que ocurría con los resultados de fr1, los valores más bajos de fr3 se han obtenido en las probetas con FP-5kg y tras estas, las probetas con FM-45/50. En el caso de

las probetas con FP-10kg y FM-65/60 los resultados de fr3 cambian. En este caso, las probetas con FP-10kg se han obtenido valores medios más altos.

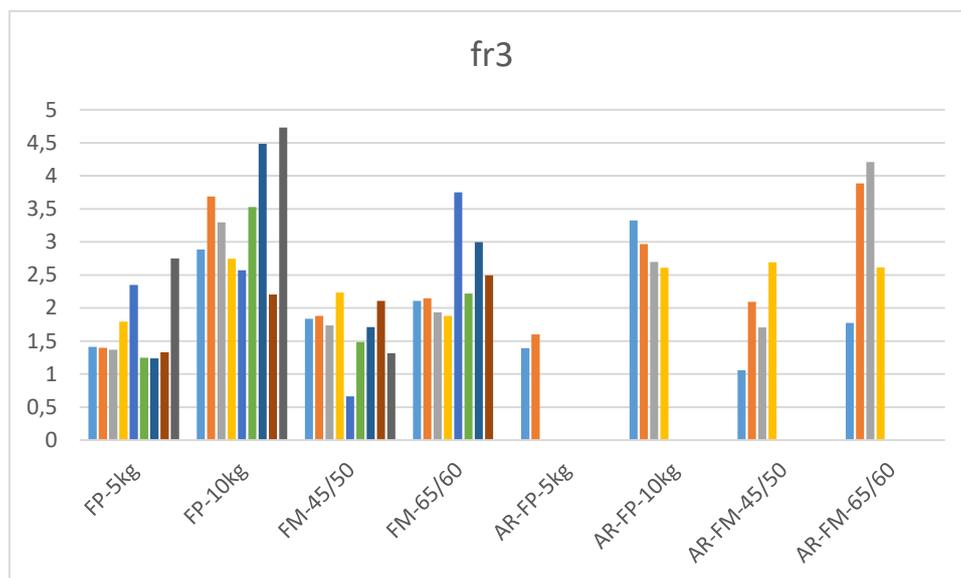


Figura 50. Valores de fr3 de las probetas prismáticas ensayadas a flexotracción

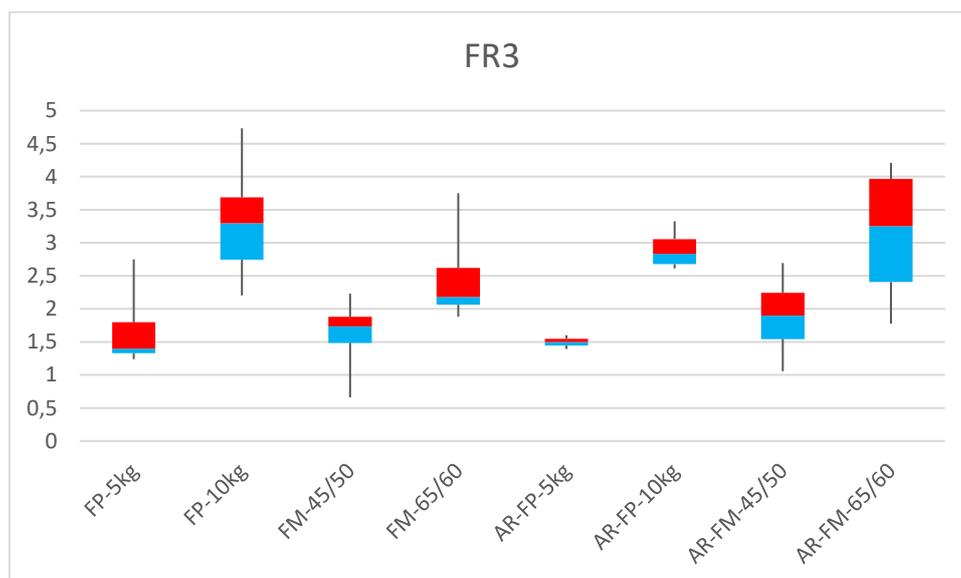


Figura 51. Diagrama de caja de los valores de fr3 de las probetas prismáticas ensayadas a flexotracción

La síntesis de los resultados obtenidos es que el hormigón con FP-10kg ha sido mejor en situaciones de recuperación de carga tras rotura no inmediata. En cambio, si lo que buscamos es una conservación de resistencia tras rotura más inmediata, o una menor abertura de fisura inicial, los hormigones con fibras metálicas, y más específicamente, aquellos con FM-65/60, han ofrecido mejores resultados. No obstante, hay que tener en cuenta que se han empleado volúmenes de fibras de polipropileno mucho mayores que de fibras de acero. Por tanto, las ventajas de las fibras de polipropileno son relativas, ya que para igualar las prestaciones de las fibras de acero se tienen que adicionar al hormigón en grandes cantidades. Este hecho tiene sus desventajas, ya que incrementa los costes y disminuye considerablemente la trabajabilidad del hormigón.

4.4. Ensayo de resistencia a flexotracción con Round Panel según ASTM C 1550-08

El ensayo de Round Panel según ASTM C 1550-08, como se ha comentado anteriormente pretende ser el punto de interés de este estudio. Su objetivo es estudiar hormigones destinados a pavimentos con un realismo de comportamiento y resultados más cercanos a los de un pavimento real que los obtenidos en ensayos con vigas y métodos tradicionales. Este método, asimismo pretende facilitar el análisis de numerosos ejemplares con diferente composición, lo cual sería imposible (o solo accesible a investigadores con elevados recursos) si se empleasen ejemplares de mayor magnitud, como los empleados en otros estudios. (Gabi, plizzari, etc). Los datos obtenidos ayudarán a demostrar que la información disponible en normativas y estudios sobre el tema son veraces en la práctica.

Se presentarán en primer lugar las gráficas de carga-deformación y tras ello las gráficas de absorción de energía-deformación. Asimismo, se analizarán y comentarán los resultados obtenidos en todos los ensayos a los paneles. Los datos de carga se obtuvieron con una célula de carga conectada al ordenador de toma de datos.

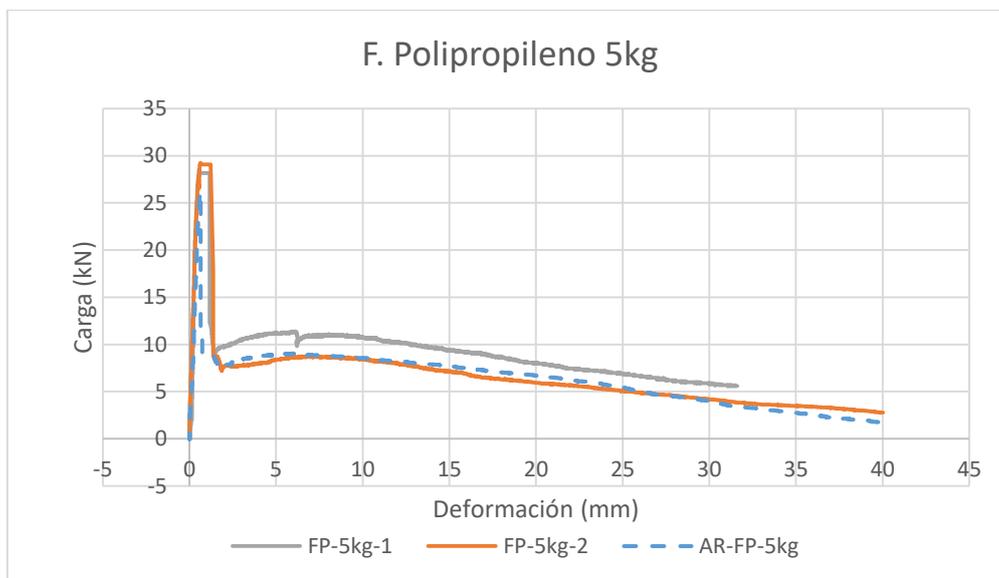


Figura 52. Gráfica carga/deformación de los paneles redondos con FP5kg

Tabla 35. Resultados obtenidos en el ensayo a paneles redondos con FP5kg

Hormigón	Carga max (kN)	W'	t (mm)	to (mm)	d (mm)	d0 (mm)	β	δ (mm)	W
FP-5kg-1	28,55	294,82	77,13	80	800	800	1,51	40	311,5
FP-5kg-2	29,23	260,57	81,76	80	800	800	1,51	40	252,16
AR-FP-5kg-1	26,18	248,12	75,3	80	800	800	1,51	40	271,81

Durante el ensayo del primer round panel se tuvieron problemas con la célula de carga, no obstante, se han tomado los datos recogidos por el “druc”. Se puede apreciar un comportamiento esperado para este tipo de hormigón. Tras la aparición de la primera fisura a los 28 kN, se sufre un descenso hasta los 9,5 kN, tras esto se experimenta una leve recuperación de la carga hasta los 8 mm de deformación. En la segunda amasada con FP-5kg se han obtenido resultados muy similares a los obtenidos con el anterior panel. La diferencia más notable frente al anterior es que en este se ha producido una caída de carga tras la rotura mayor. Afectando asimismo a los valores de carga con el aumento de la deformación. Esto supone la obtención de una menor energía absorbida. La sustitución de áridos reciclados en la amasada con FP-5kg tuvo efectos en las resistencia máxima alcanzada y la recuperación de la misma tras aparición de primera fisura respecto a las amasadas con áridos tradicionales y el mismo tipo y cantidad de fibras.

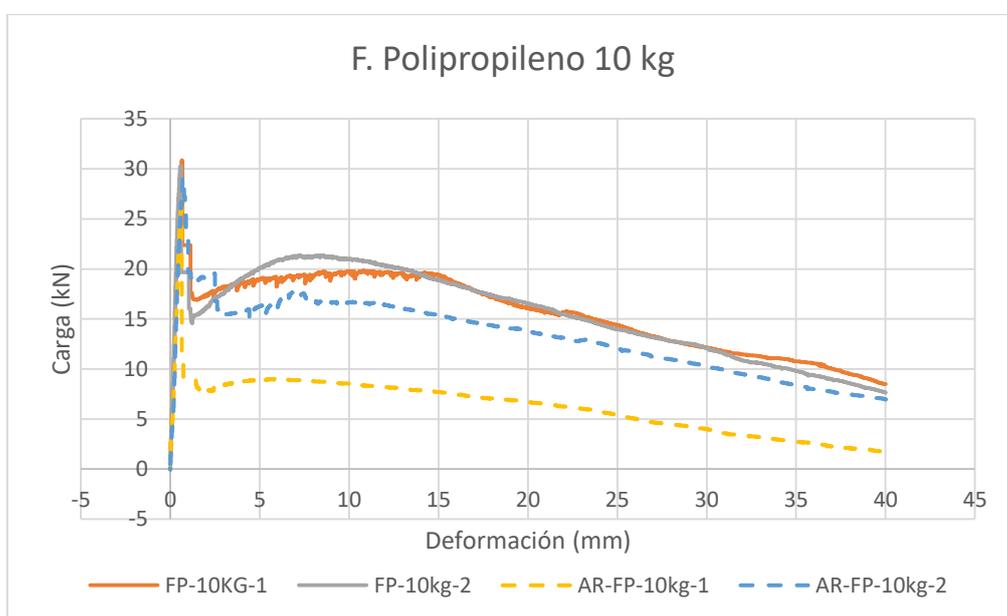


Figura 53. Gráfica carga/deformación de los paneles redondos con FP10kg

Tabla 36. Resultados obtenidos en el ensayo a paneles redondos con FP10kg

Hormigón	Carga max (kN)	W'	t (mm)	to (mm)	d (mm)	d0 (mm)	β	δ (mm)	W
FP-10kg-1	30,86	622,3	78,5	80	800	800	1,51	40	640,3
FP-10kg-2	30,29	622,18	79,59	80	800	800	1,51	40	627,02
AR-FP-10kg-1	30,04	639,67	79,89	80	800	800	1,51	40	641
AR-FP-10kg-2	29,18	529,4	77,6	80	800	800	1,51	40	554,29

Con el empleo de FP-10kg se observa un cambio de comportamiento drástico frente a la dosificación de 5kg/m³. Pese a que la carga máxima alcanzada es similar, se experimenta una caída mucho menor tras la aparición de la primera fisura. Asimismo, la recuperación de carga es visiblemente mayor, llegando a rondar los 20kN, casi un 70% de la carga máxima. Tras los 15mm de deformación se experimenta una bajada de resistencia más acelerada. Una de los datos clave que puede demostrarnos la mejora de propiedades con ésta dosificación frente a la anterior es la energía absorbida. Se han obtenido valores superiores a 600, mientras que en los RP-FP-5kg

se han obtenido valores de energía absorbida inferiores a 300. La segunda amasada de RP-FP-10kg es un claro reflejo de la poca dispersión de resultados que se obtiene al ensayar éste tipo de probetas. Los datos obtenidos en ambas amasadas han sido muy similares, excepto que en la segunda la curva de deformación ha sido más estable, ya que no se han experimentado despegamientos de fibras. En el primer ensayo de paneles redondos con AR-FP-10kg se dieron unas circunstancias inusuales. La velocidad del ensayo fue superior al resto, debido a que hubo problemas con la aplicación de la carga en su inicio. Ésta tardó más tiempo de lo común en empezar y, una vez lo hizo, aumento de forma muy acelerada. Como puede apreciarse en la figura 84 se alcanzó una resistencia máxima superior a la esperada. Asimismo, se pueden apreciar dos curvas inusuales tras la aparición de la primera fisura. Esto se debe al intento de estabilizar la velocidad de carga con una prensa hidráulica la cual se manipulaba manualmente y con alta sensibilidad. Este hecho no hubiese sucedido si se hubiese empleado una prensa electrónica, en la cual se pudiese controlar de mejor manera la velocidad y los tiempos. Por tanto los datos obtenidos en esta amasada no son fiables del todo, ya que además de la aparición de las dos curvas excesivas, el aumento general de velocidad de carga ha podido provocar la obtención de resistencias superiores a las que se obtendrían en situaciones normales. La segunda amasada de AR-RP-FP-10kg ofrece unos resultados más fiables que la anterior. Se produce una caída de resistencia tras la aparición de la primera fisura de poca magnitud, no obstante, poco después, ésta cae bruscamente hasta los 15,5kN. Tras esto, se vuelve a experimentar una recuperación de la resistencia que tiende a disminuir progresivamente tras alcanzar de los 10 mm de deformación.

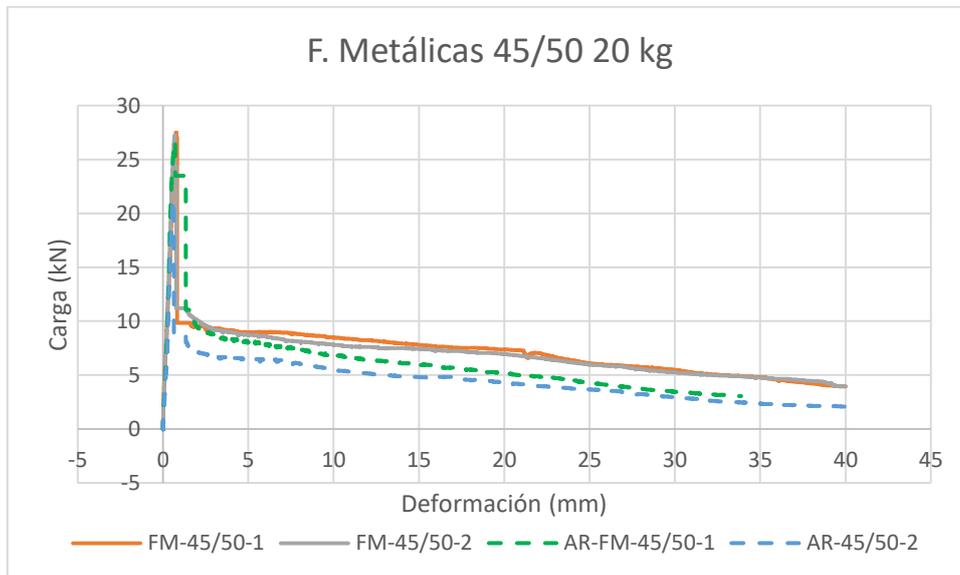


Figura 54. Gráfica carga/deformación de los paneles redondos con FM45/50

Tabla 37. Resultados obtenidos en el ensayo a paneles redondos con FM45/50

Hormigón	Carga max (kN)	W'	t (mm)	to (mm)	d (mm)	d0 (mm)	β	δ (mm)	W
FM-45/50-1	27,49	284,72	77,13	80	800	800	1,51	40	300,83
FM-45/50-2	27,24	275,83	77,19	80	800	800	1,51	40	291,09
AR-FM-45/50-1	26,69	159,04	79,58	80	800	800	1,51	40	160,3
AR-FM-45/50-2	21,27	178,22	81,1	80	800	800	1,51	40	174,59

El cambio de tipo de fibras empleado en las amasadas con FM-45/50 hace que cambie el comportamiento del hormigón. Las resistencia máxima obtenidas no han sufrido variaciones importantes respecto a los paneles con fibras de polipropileno ensayados, aunque sí es cierto que ha sido ligeramente menor. La mayor diferencia la podemos apreciar tras la aparición de la primera fisura. La caída de resistencia experimentada en ese momento es equivalente a la de los RP-FP-5kg. No obstante, a diferencia de los ensayos a los mismos, no se ha experimentado recuperación de la carga. El punto clave del empleo de FM-45/50 ha sido la estabilización en la reducción de la resistencia con la deformación, ya que esta se reduce a una velocidad que podríamos considerar constante. En cuanto a la absorción de energía, ésta ha sido similar a la experimentada en los RP-FP-5kg. Como ocurrió en las amasadas con áridos tradicionales, el empleo de AR-FM-45/50 hace que se sufran caídas de resistencia tras aparición de primera fisura de gran magnitud. Tras esto, experimenta una disminución de resistencia estable, sin recuperaciones de carga. La segunda amasada con AR-FM-45/50 tiene características similares a la primera, no obstante, no se han alcanzado resistencias máximas tan elevadas, propiciado que se haya obtenido un valor de absorción de energía ligeramente superior. Al igual que lo ocurrido entre las amasadas de RP-FP-10kg, entre las amasadas de RP-FM-45/50 se ha producido una dispersión de resultados prácticamente nula. Tanto la carga máxima alcanzada como el comportamiento post-fisura ha sido similar.

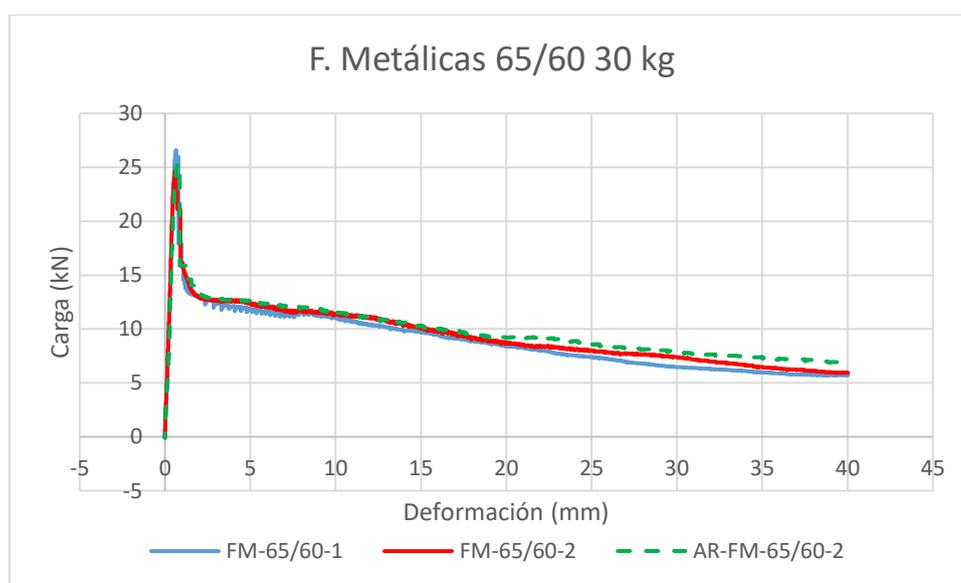


Figura 55. Gráfica carga/deformación de los paneles redondos con FM65/60

Tabla 38. Resultados obtenidos en el ensayo a paneles redondos con FM65/60

Hormigón	Carga max (kN)	W'	t (mm)	to (mm)	d (mm)	d0 (mm)	β	δ (mm)	W
FM-65/60-1	26,61	355,58	76,14	80	800	800	1,51	40	383,08
FM-65/60-2	24,59	374,22	77,95	80	800	800	1,51	40	389,15
AR-FM-65/60-1	23,91	-	78,25	80	800	800	1,51	40	-
AR-FM-65/60-2	25,34	392,49	76,14	80	800	800	1,51	40	422,84

El empleo de FM-65/60 ha producido un comportamiento similar en el hormigón al producido por las FM-45/50. No obstante, se ha experimentado una caída de resistencia tras rotura menor.

Esto puede deberse muy probablemente al aumento de la dosificación de las fibras respecto al hormigón con FM-45/50, ya que se emplean 30kg/m^3 de hormigón frente a los 20kg/m^3 de FM-45/50. La energía absorbida, por tanto, ha sido considerablemente mayor, aunque menor a la de los RP-FP-10kg. Al igual que en la dosificación anterior, las caídas de resistencia son progresivas y no se experimentan recuperaciones de carga tras rotura. La segunda amasada posee características similares a la anterior con las mismas fibras. La única diferencia apreciable es un ligero aumento de la energía absorbida, probablemente debido a la orientación y distribución de las fibras. Durante el ensayo al primer panel redondo con AR-FM-65/60 se produjeron problemas con el captador de desplazamiento. Se aprecia una significativa reducción de la pérdida de resistencia tras la aparición de la primera fisura respecto a las amasadas con AR-FM-45/50. Durante el ensayo al segundo panel redondo con AR-FP-65/60 se han obtenido valores de resistencia similares a las del panel anterior. Al igual que ocurría con los paneles con áridos tradicionales, los paneles con AR-FM-65/60 presentan valores de absorción de energía menores a los de los paneles con AR-FP-10kg.

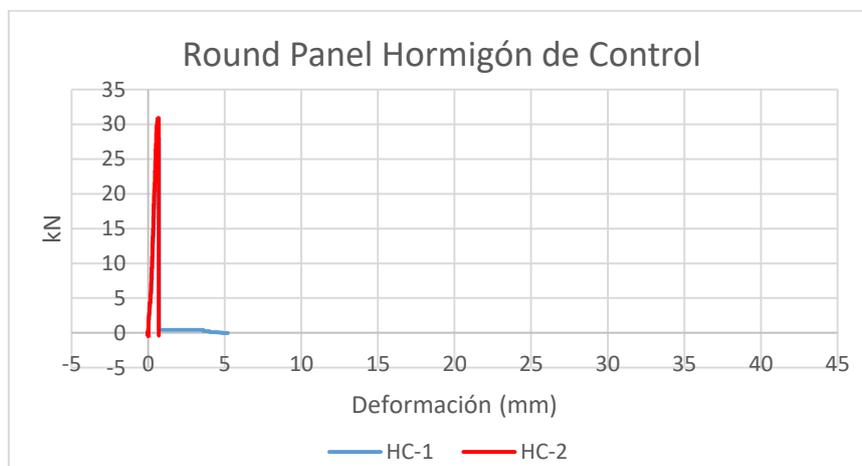


Figura 56. Gráfica carga/deformación de los paneles redondos con HC

Al igual que ocurriera en las probetas cilíndricas, en los dos paneles de hormigón de control se obtuvieron valores de resistencia máxima mayores que en el resto de probetas. Se puede observar que la energía absorbida en ausencia de fibras presenta valores muy bajos. La figura 56 presenta las cargas máximas alcanzadas de las diferentes amasadas, agrupadas por amasadas que comparten tipo de fibra empleado.

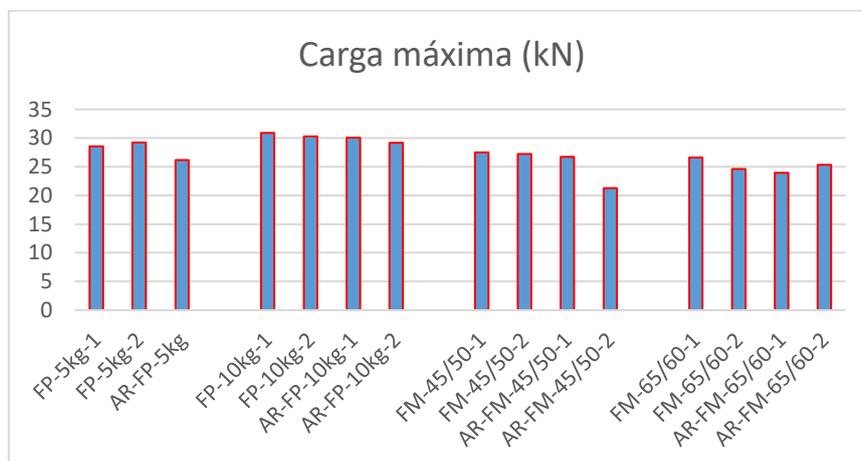


Figura 57. Cargas máximas alcanzadas en los paneles redondos ensayados

Se puede apreciar que nos encontramos valores entre 25 y 30, con alguna excepción como en la amasada AR-FM-45/50-2. De los resultados obtenidos se puede extraer que las cargas máximas alcanzadas más elevadas se han producido en amasadas con fibras de polipropileno, siendo dentro de estas las de 10 kg/m³ las que mejores resultados han dado.

En la figura 57 se puede apreciar la energía absorbida durante el ensayo de cada panel redondo. Se observa que las amasadas con FP-10kg han obtenido resultados mucho mejores que el resto.

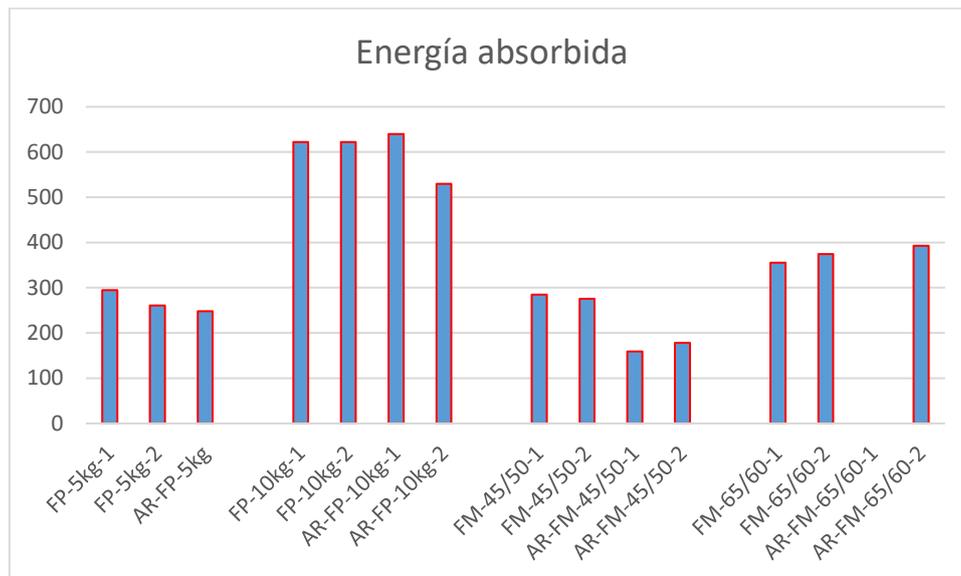


Figura 58. Energía absorbida obtenida en los paneles redondos ensayados

En este caso, el segundo tipo de hormigón que mejores resultados ha dado ha sido el que contiene FM-65/60. La síntesis de la información recogida hace darse cuenta de que la adición de fibras afecta mucho más a la absorción de energía tras rotura que a la contribución a alcanzar cargas máximas pre-fisura.

La figura 59 muestra que en las probetas con FP-5kg la energía absorbida tiene un pico muy notable justo en el momento de la rotura. Tras esto aumenta de forma constante, pero reduciendo capacidad de absorción de energía conforme aumenta la deformación.

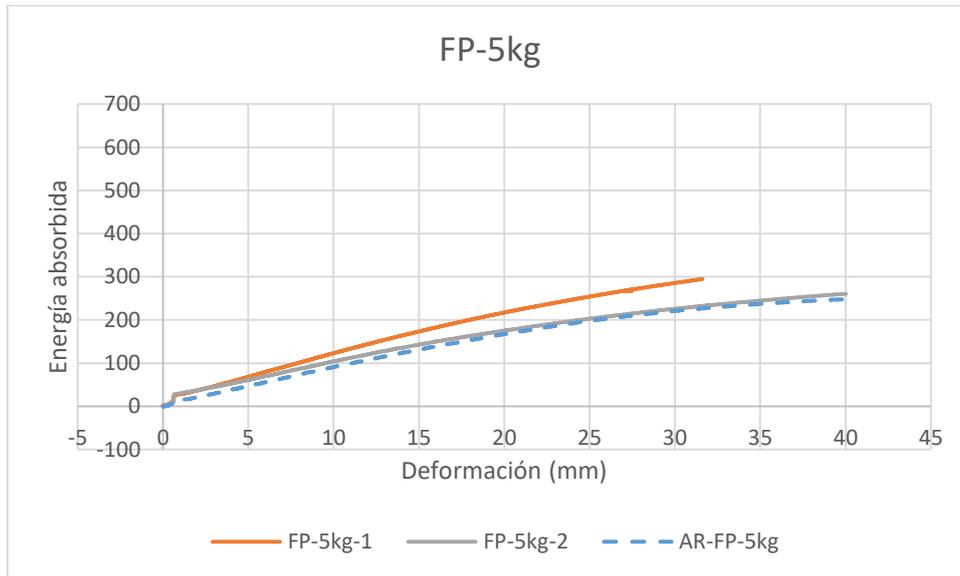


Figura 59. Energía absorbida acumulada obtenida en los paneles redondos con FP-5kg

Los paneles redondos con FP-10 kg presentan valores de absorción de energía bastante homogéneos entre amasadas. EN este caso, la capacidad de absorción de energía no decrece tanto conforme aumenta la deformación respecto a los paneles con FP-5kg.

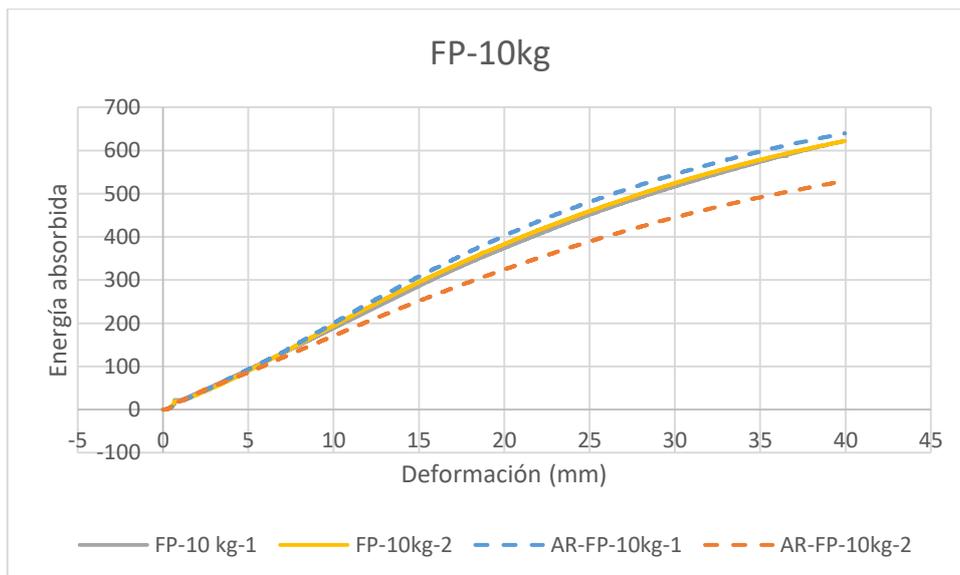


Figura 60. Energía absorbida acumulada obtenida en los paneles redondos con FP-10kg

La absorción de energía en los paneles con FM-45/50 presenta pautas similares a la de los paneles con FP-5kg. En esta figura se confirma el dato visible en la figura 95 donde se reduce la absorción de energía en las amasadas con AR-FM-45/50.

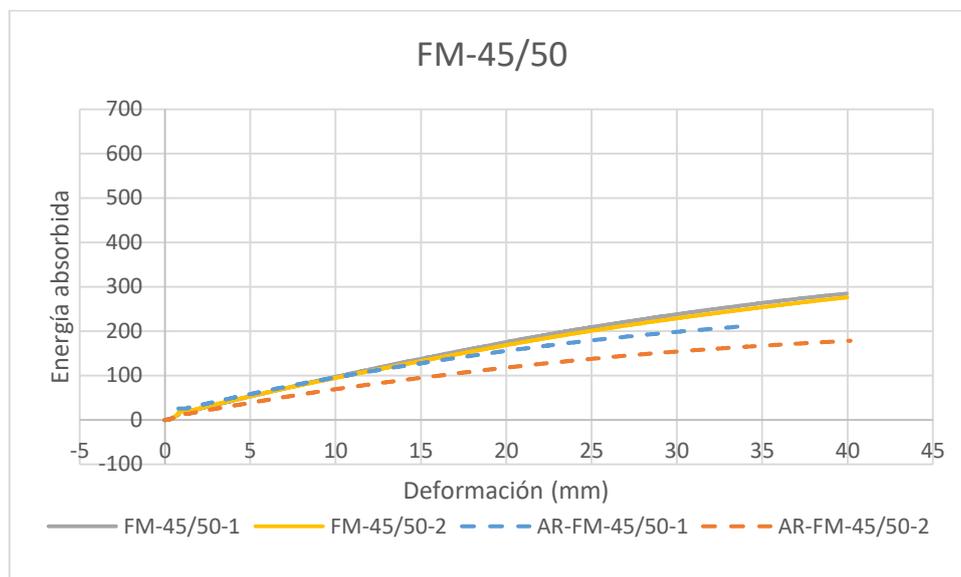


Figura 61. Energía absorbida acumulada obtenida en los paneles redondos con FM45/50

Los paneles redondos con FM-65/60 han presentado una evolución de la energía absorbida muy estable entre las diferentes amasadas. Como ocurría con los paneles redondos con FP-10 kg, la pérdida de velocidad en la acumulación de energía absorbida se produce de forma muy suave.

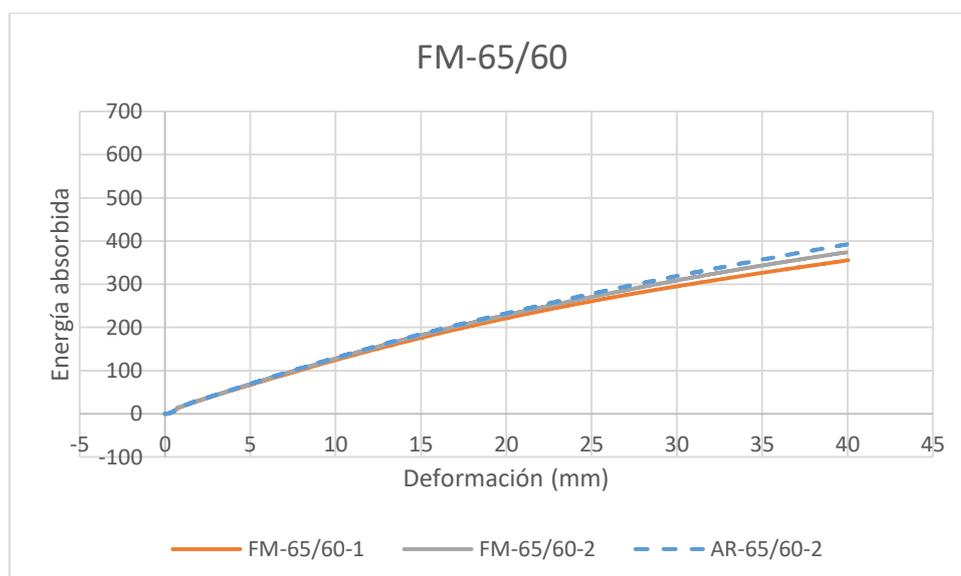


Figura 62. Energía absorbida acumulada obtenida en los paneles redondos con FM 65/60

La síntesis de lo observado en las gráficas de energía absorbida se puede resumir en dos conclusiones:

- La adición de áridos reciclados no influye en la capacidad de absorción de energía.
- La adición de FP-65/60 (30 kg/m³) y de FP-10kg/m³ asegura una capacidad de absorción de energía aún con grandes deformaciones mayor que las dosificaciones con menor cantidad de fibras (FM-45/50 y FP-5kg).
- La capacidad de absorción de energía es mayor en el momento de la rotura, tras lo cual disminuye de forma progresiva con el aumento de la deformación.

5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se tratan los aspectos más significativos del trabajo realizado. Se definirán las conclusiones a las que se ha llegado, así como una serie de futuras líneas de investigación para continuar el estudio de hormigones para pavimentos de hormigón con fibras de acero y fibras de polipropileno con sustitución parcial de áridos reciclados.

5.1. Conclusiones

Las fibras empleadas en las amasadas cumplen con la función de aumentar el comportamiento plástico del hormigón en diferente medida. Los mejores resultados se han obtenido en aquellos hormigones con mayor cantidad de fibras, es decir, aquellos que contienen FP10kg (10 kg de fibras de polipropileno por metro cúbico) y las que contienen FM65/60 (30 kg de fibras de acero 65/60 por metro cúbico). Estas fibras en la dosificación indicada consiguen una reducción de la caída de resistencia mayor a los otros dos tipos. No obstante, el único hormigón que ha conseguido recuperaciones de resistencia tras rotura evidentes ha sido el hormigón con FP10kg. Ésta recuperación también se ha observado en las amasadas con FP5kg, pero de manera mucho más discreta. Hay que destacar que se han empleado volúmenes de fibras de polipropileno mucho mayores que de fibras de acero. Por tanto, las ventajas de las fibras de polipropileno son relativas, ya que para igualar las prestaciones de las fibras de acero, éstas se deben adicionar al hormigón en grandes cantidades. Este hecho tiene sus desventajas, ya que incrementa los costes y disminuye considerablemente la trabajabilidad del hormigón.

Tras la rotura, los hormigones con fibras metálicas, aunque no han experimentado recuperaciones de energía, sí han producido una pérdida de resistencia con el aumento de la deformación más estable y progresiva. Asimismo, se han experimentado caídas menos bruscas que con las fibras de polipropileno. Estas fibras, por tanto, son mejores si buscamos mayor control de la fisuración inicial.

Los ensayos mecánicos han dado algunos valores imprecisos, obteniéndose rangos elevados de valores post-fisuración. La solución a este problema pasa por la realización de una mayor cantidad de probetas, de manera que se facilite la homogeneización de los resultados.

Entre los diferentes tipos de ensayos realizados, el ensayo del panel redondo es el que ha dado menores dispersiones en los resultados, siendo por tanto, el método más fiable de los que se han realizado. De esto se extrae que con un menor número de ensayos y probetas de paneles redondos, se pueden obtener resultados más válidos que ensayándose una mayor cantidad de

probetas prismáticas por métodos tradicionales, con el ahorro de tiempo y recursos que ello conlleva.

La capacidad de absorción de energía está directamente ligada a la cantidad de fibras empleada. Los mejores resultados de absorción de energía se han obtenido en los hormigones con FP10kg y con FM65/60.

La sustitución parcial de áridos reciclados efectuada en parte de las amasadas no ha producido pérdidas de resistencia significativas ni incompatibilidades con el resto de materiales apreciables. Por tanto, con valores de sustitución parcial del 50% de árido grueso por árido reciclado mixto, se ha demostrado que se pueden obtener hormigones de calidad equivalente a aquellos que emplean áridos tradicionales en su totalidad.

5.2. Futuras líneas de investigación

Como futuros campos de estudio para continuar los con los frentes de esta tesis, se proponen varias ideas.

Por una parte, se propone la realización de una mayor cantidad de probetas con las mismas condiciones que las empleadas para asegurar y confirmar la validez de los resultados obtenidos en el presente estudio.

Por otra parte, sería interesante estudiar mejor el efecto de las fibras de acero empleadas, ya que, al contrario que con las fibras de polipropileno, sólo se ha utilizado cada tipo de fibra de acero en una cantidad determinada. Se propone, por tanto el empleo de 30kg/m³ de fibras de acero 45/50 y de 20kg/m³ de fibras de acero 65/60.

Otra de las propuestas es la realización de amasadas con los mismos tipos de hormigones, empleando en este caso paneles redondos de diferentes dimensiones como los explicados al inicio de este documento [53] [51] [52].

En lo referente a áridos reciclados, sería conveniente la realización de probetas con áridos reciclados mixtos con proporciones de materiales diferentes para dar mayor realismo a los efectos que pueden provocar este tipo de áridos, ya que la composición de los mismos puede variar de manera muy importante dependiendo de su origen. Como dato curioso a estudiar, se propone a realización de amasadas con una sustitución total de áridos reciclados mixtos por árido grueso.

Por último, y como futura línea de investigación más destacada, se propone la realización de elementos de mayor magnitud con los hormigones empleados en este estudio, los cuales se ensayen sobre una superficie de muelles que simule un terreno real, tal como se ha llevado a cabo en estudios precedentes a este. [46] [45] [44]

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] EHE- 08 - Instrucción de Hormigón Estructural, Ministerio de Fomento de España, 2010.
- [2] ACI Committee 544, «ACI 544.1R-96 - State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete,» *ACI Structural Journal*, 96, 2009.
- [3] R. K. Greig, R. P. Knowles, K. J. Pearson, J. W. Smith y E. J. Smith, «Un procedimiento para hacer un material de cemento compuesto, reforzado con fibras de vidrio». Gran Bretaña Patente 8417351, 6 Julio 1984.
- [4] P. Pujadas, A. Aguado y M. Vandewalle, Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno, Universidad Politécnica De Cataluña, 2008.
- [5] Maccaferri, Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón - Manual Técnico, 2005.
- [6] E. A. Byars, P. Waldron, V. Dejke, S. Demis y S. Heddadin, «Durability of FRP in concrete, current specifications and a new approach,» *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 19, pp. 1-2, 2003.
- [7] D. J. Hannant, Fibre Cements and Fibre Contents, John Wiley & Sons, Ltd., 1978.
- [8] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), «JSCE-SF4 Standard dor Flexural Strength and Flexural Toughness,» *Concrete Library of JSCE*, nº 3, pp. 58-66, 1984.
- [9] ACI 506.1R-08, *Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete*, 2008.
- [10] B. Massicotte, G. Degrange y N. Dzeletovic, «Mix design for SFRC bridge deck construction.,» *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)*, pp. 119-128, 2000.
- [11] V. Bindiganavile y N. Banthia, «Rebound reduction in steel fiber reinforced dry-mix shotcrete through matrix modifications,» *Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete (FRC)*, pp. 149-157, 2000.
- [12] A. E. Naaman, «Fibre Reinforcements for Concrete: looking back, looking ahead,» *Rilem Proceedings*, vol. 15, 2000.
- [13] Bekaert, «Manual de fibras metálicas,» Marzo 2014. [En línea]. Available: <http://www.eic.cat/gfe/docs/14224.pdf>. [Último acceso: 15 7 2016].
- [14] B. Gencil y Ozel, «Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Reinforced with Polypropylene Fibres,» *Materials Research Innovations*, vol. 15, pp. 216-225, 2011.
- [15] J. Bayasi y Z. Zeng, «Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,» *ACI Materials Journal*, vol. 90, nº 6, pp. 605-610, 1993.

-
- [16] J. Turmo, N. Banthia, R. Gettu y B. Barragan, «Estudio del comportamiento a cortante de vigas,» *Materiales de Construcción*, vol. 58, nº 292, pp. 5-13, 2008.
- [17] ACHE, Manual de Tecnología del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/2, Hormigones Con Fibras, 2000.
- [18] E. J. Gimenez, Propiedades mecánicas y de adherencia de hormigones con fibras de acero contaminados con cloruros, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 1987.
- [19] ACI 544.4R-88, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, 88 (Reapproved), 2009.
- [20] B. E. Barragán, Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.
- [21] M. Valle y O. Büyüköztürk, «Behaviour of Fibre Reinforced High-Strength Concrete Under Direct Shear,» *Materials Journal*, vol. 90, nº 2, pp. 122-133, 1993.
- [22] G. Giaccio, A. Giovambattista y R. Zerbino, «Concrete Reinforced with Collated Steel Fibers: Influence of Separation,» *Journal Proceedings*, vol. 83, nº 2, pp. 232-235, 1986.
- [23] P. Serna y S. Arango, «Evolution of the flexural behaviour of precracked SFRC in marine environment,» *BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, pp. 595 - 605, 2008.
- [24] D. Nemegeer, J. Vanbrabant y H. Stang, «Final report on Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete,» *Subtask 5.1 Durability of SFRC, Brite Euram Project BRPR-CT98-0813*, 2000.
- [25] E. F. O'Neil y J. T. Devlin, «Durability of Fiber-Reinforced Concrete Under Flexural Stress in a Severe Marine Environment,» *US Army Corps of Engineers - Engineer Research and Development Center*, 1999.
- [26] P. Mehta, «Reducing the environmental impact of concrete,» *Concrete international Journal*, pp. 61-66, 2001.
- [27] P. Glushge, «The work of the Scientific Research Institute,» *Gidrotskhnikheskoge Stroilestvo*, nº 4, pp. 27-28, 1946.
- [28] A. D. Buck, «Recycled concrete,» *Highway Research Record*, vol. 430, pp. 1-8, 1973.
- [29] V. Malhorta, Use of Recycled Concrete as a new Aggregate, Canadian Center of Mineral and Energy Technology, 1976.
- [30] S. Frondistou-Yannas, «Waste concrete as aggregate for new concrete,» *ACI Journal*, pp. 373-376, 1977.
- [31] P. Nixon, «Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete - A Review, RILEM TC-37-DRC,» *Materials and Structures (RILEM)*, vol. 11, 1978.

- [32] A. D. Buck, «Recycled Concrete as a Source of Aggregate,» *Journal of the American Concrete Institute*, vol. 41, nº 5, pp. 212-220, 1977.
- [33] G. Di Niro, R. Cairns y E. Dolara, «Properties of Hardened RAC for Structural Purposes. Use of Recycled concrete aggregate,» *Sustainable construction*, pp. 177-188, 1988.
- [34] M. Sogo, T. Sogabe, I. Maruyama, R. Sato y K. Kawai, «Shear behaviour of reinforced recycled concrete beams,» de *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spain; 525-535, 2004.
- [35] K. Konno, Y. Sato, Y. Kakuta y M. Ohira, «Property of recycled aggregate column encased by steel tube subjected to axial compression,» *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 19, pp. 231-238, 1997.
- [36] V. Corinaldesi, «Recycled aggregate concrete under cyclic loading,» *Proceedings of the International Symposium on Role of Concrete in Sustainable Development, University of Dundee, Scotland*, pp. 509-518, 2003.
- [37] J. Z. Xiao, J. B. Li y C. H. Zhang, «On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview,» *Materials and Structures*, vol. 39, nº 6, pp. 655-664, 2006.
- [38] A. Abbas, G. Fathifazl y O. Isgor, «Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, nº 8, pp. 555-563, 2009.
- [39] GERD, *Guia Espanola De Aridos Reciclados Procedentes de RCD*, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011.
- [40] G. d. E. d. R. d. Derribos, «<http://www.concretonline.com/>,» [En línea]. Available: http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&view=article&id=353&catid=59:articulos-tecnicos&Itemid=100089. [Último acceso: 20 Julio 2016].
- [41] A. Guillén, P. Serna y M. J. Pelufo, *Proyecto final de carrera - Influencia del tiempo de amasado y de la humedad de los áridos reciclados en las características mecánicas del hormigón reciclado*, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2014.
- [42] J. Xiao, «Flexural behaviour of recycled aggregate concrete graded slabs,» *Structural concrete*, vol. 16, nº 2, pp. 249-261, 2015.
- [43] W. Li y J. Xiao, «Structural Behaviour of Composite Members with Recycled Aggregate Concrete - an Overview,» *ADVANCES IN STRUCTURAL ENGINEERING*, vol. 18, nº 6, pp. 919-938, 2015.
- [44] L. Sorelli, A. Meda y G. Plizzari, «Steel fiber concrete slabs on ground: A structural matter,» *ACI Structural Journal*, vol. 103, pp. 551-558, 2006.
- [45] J. Bothma, *The Structural Use of Synthetic Fibres : Thickness Design of Concrete Slabs on Grade*, Stellenbosch University, 2013.

-
- [46] J. G. Guzmán y P. Serna, Proyecto final de Máster - Estudio técnico experimental de una placa de hormigón reforzada con fibras de acero apoyada en el suelo aplicado en obras portuarias, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2015.
- [47] A. M. Brandt, J. Olek y I. H. Marshall, «Round panel vs. beam tests toward a comprehensive and harmonic characterization of FRC materials,» *Brittle Matrix Composites*, nº 9, p. 23, 2009.
- [48] ASTM C 1550 - 08, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel), 2008.
- [49] AENOR UNE - EN 14651: 2007 + A1, Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual), 2008.
- [50] E. S. Bernard y G. G. Xu, Crack widths in ASTM C1550 panels, Penrith, Australia: TSE P/L, 2008.
- [51] D. Ciancio, C. Mazzotti y N. Muratti, «Evaluation of fibre-reinforced concrete fracture energy through tests on notched round determinate panels with different diameters,» *Construction and Building Materials*, vol. 52, p. 86–95, 2014.
- [52] F. Minelli y G. Plizzari, «Derivation of a simplified stress–crack width law for Fiber Reinforced Concrete through a revised round panel test,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 58, pp. 95-104, 2015.
- [53] D. Ciancio, M. Manca, N. Buratti y C. Mazzotti, «Structural and material properties of Mini notched Round Determinate Panels,» *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 395-403, 2016.
- [54] «aquadea,» [En línea]. Available: www.aquadea.es. [Último acceso: 12 06 2016].
- [55] AENOR, UNE-EN 12390 - 3 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, 2009.

7. ANEXO

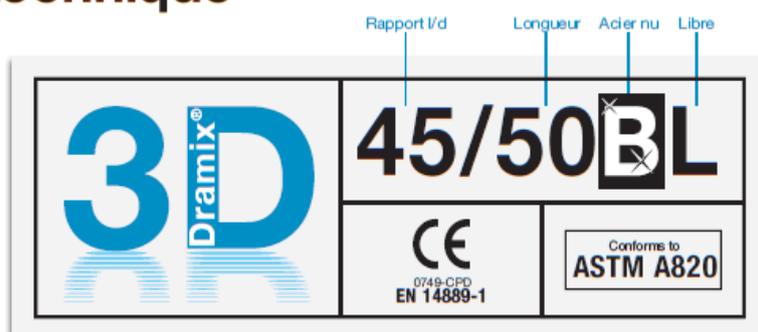
7.1. Fichas técnicas del vendedor de fibras de acero empleadas

Dramix®

 **BEKAERT**

better together

Fiche technique



DRAMIX® 3D



La gamme Dramix® 3D est la référence dans le renforcement en fibres d'acier. En combinant des performances élevées, une durabilité et une facilité d'utilisation, la gamme 3D vous offre une alternative plus rapide et rentable face aux solutions traditionnelles de renforcement du béton.

- > Ancrage original
- > Résistance à la traction standard

Dramix® 3D est une solution économique pour

- > les sols industriels
- > les applications relatives aux tunnels
- > la préfabrication
- > les applications relatives aux bâtiments résidentiels

Bekaert fournit toute l'assistance dont vous avez besoin pour votre projet. Nous vous aidons à déterminer les types de fibres les plus appropriées, nous calculons les dosages optimum et sélectionnons la qualité de béton adéquate.

Contactez votre assistance locale.

Consultez www.bekaert.com/dosingdramix pour connaître nos recommandations relatives à la manipulation, au dosage et au malaxage.

Sous réserve de modifications. Toutes les informations de ce document décrivent nos produits de manière générale uniquement. Les informations détaillées et les spécifications des produits sont disponibles sur demande.

PERFORMANCES

Propriétés du matériau

Résistance à la traction :
 $R_{m, nom}$: 1.115 N/mm²
 Tolérances : ± 7,5% moyenne
Module de Young : ± 210.000 N/mm²

Géométrie

Famille de fibre	3D	
Longueur (l)	50 mm	
Diamètre (d)	1,05 mm	
Etlacement (l/d)	45	

Réseau de fibre

2,9 km par m³ (pour 20 kg/m³)
 2.802 fibres/kg
Dosage minimum :
 20 kg par m³ (conformément au label CE)

Gamme Dramix®

	5R	4R	3D
Résistance à la traction			
Ductilité du fil			
Résistance de l'ancrage			

CERTIFICATS DU PRODUIT



Dramix® est certifié pour une utilisation structurelle conformément à la norme EN 14889-1 (système '1'). Une information détaillée est disponible sur demande.

CERTIFICATS DU SYSTÈME



Toutes les usines Dramix® sont certifiées ISO 9001 et ISO 14001.

EMBALLAGE



SACS 20 kg

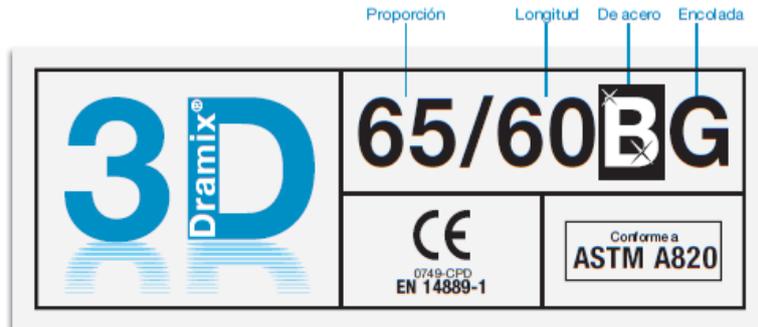
BIG BAG 800 kg

STOCKAGE



Figura 63. Ficha técnica de fibras de acero 45/50

Ficha Técnica



DRAMIX® 3D



Dramix® 3D es la referencia en refuerzos con fibra de acero. Gracias a su combinación de rendimiento, durabilidad y fácil manejo, 3D es una solución eficiente para un gran número de utilidades y le permite ahorrar tiempo y dinero.

- > anclaje original
- > resistencia a la tracción

Dramix® 3D es una solución rentable para

- > pavimento
- > túneles
- > prefabricados
- > viviendas

Bekaert le ofrece todo el apoyo que necesita para su proyecto. Le ayudamos a elegir el tipo de fibra que más le conviene, la dosificación necesaria y el tipo de hormigón correcto.

Póngase en contacto con su asesor local.

Visite www.bekaert.com/dosingdramix para conocer nuestras recomendaciones sobre manipulación, dosificación y mezcla.

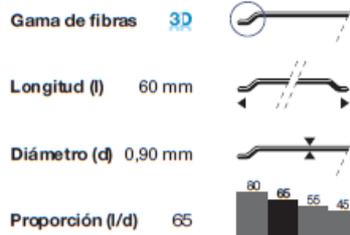
Reservado el derecho a modificaciones. Todos los datos describen nuestros productos con carácter meramente general. Para una información más detallada, solicite las especificaciones técnicas de los productos.

RENDIMIENTO

Propiedades del material

Resistencia a la tracción:
 $R_{m, nom}$: 1.160 N/mm²
 Tolerancias: ± 7,5% promedio
Módulo de Young: ± 210.000 N/mm²

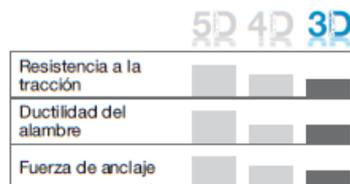
Geometría



Red de fibra

3,0 km por m³ (para 15 kg/m³)
 3.183 Fibras/kg
Dosificación mínima:
 15 kg por m³ (según la CE)

Gama Dramix®



CERTIFICACIONES DEL PRODUCTO



Dramix® dispone del certificado para uso estructural conforme a la EN 14889-1 (sistema '1'). Si lo desea, puede solicitar información más detallada.

CERTIFICACIÓN DE SISTEMAS



Todas las plantas industriales Dramix® cuentan con la certificación ISO 9001 e ISO 14001.

EMBALAJE



ALMACENAJE



Figura 64. Ficha técnica de fibras de acero 65/60

7.2. Fichas técnicas del vendedor de fibras de polipropileno empleadas



We create chemistry

MasterFiber 249

Fibra de polipropileno monofilamento resistente a los álcalis y destinada al refuerzo estructural de hormigón y productos derivados del cemento.

CAMPO DE APLICACIÓN

MasterFiber 249 es una fibra 100% polipropileno transparente de altas prestaciones debido a su excelente resistencia a la tracción y su elevada adherencia a la matriz del hormigón, especialmente diseñada para su empleo en hormigón y hormigón prefabricado.

Se incorpora en la fabricación de homigones y morteros para mejorar su comportamiento.

MasterFiber 249 se aplica donde se requiera una mejora en la ductilidad del hormigón y mortero, así como un control eficaz de la fisuración por retracción.

Se emplea para la realización de:

- Prefabricados: como sustitución del mallazo convencional – control de la fisuración por retracción – protección contra el fuego.
- Pavimentos: como sustitución del mallazo de reparto – control de la fisuración por retracción.

MasterFiber 249 también puede aplicarse en hormigón armado, ya que no presenta incompatibilidades frente al acero ni disminuye la adherencia entre la armadura y el hormigón.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

PROPIEDADES

- Reduce la formación de micro fisuras de retracción.
- Reduce la formación de fisuras.
- Aumenta la ductilidad.
- Refuerzo contra el impacto.
- Refuerzo a la disgregación.
- Disminuye la permeabilidad.
- Protege frente a la oxidación.
- Resistente a la corrosión.
- Seguro y fácil de usar.



DOSIFICACIÓN

Para el control de la fisuración por retracción en pavimentos y elementos prefabricados, las dosificaciones habituales están comprendidas entre 2 y 5 kg/m³.

Dosificaciones comprendidas entre los 3 y 10 kg/m³ son factibles, aunque se recomienda la realización de ensayos previos para verificar que el comportamiento reológico y la dispersión de la fibra en el hormigón-mortero son los adecuados.

MODO DE UTILIZACIÓN

MasterFiber 249 se puede dosificar tanto en la planta de hormigón como a la llegada del camión a obra, asegurando un tiempo de mezclado suficiente para repartir la fibra por todo el hormigón (mínimo 5 minutos).

Incorporar la dosis de producto a la hormigonera como un componente más del hormigón, en cualquier momento de la mezcla o al final del mismo, pero nunca directamente sobre el agua antes de agregar el resto de componentes.

El producto no requiere ninguna precaución especial para su manejo.

7.3. Gráficas obtenidas en el ensayo de flexotracción a tres puntos según UNE - EN - 14651: 2007 + A1

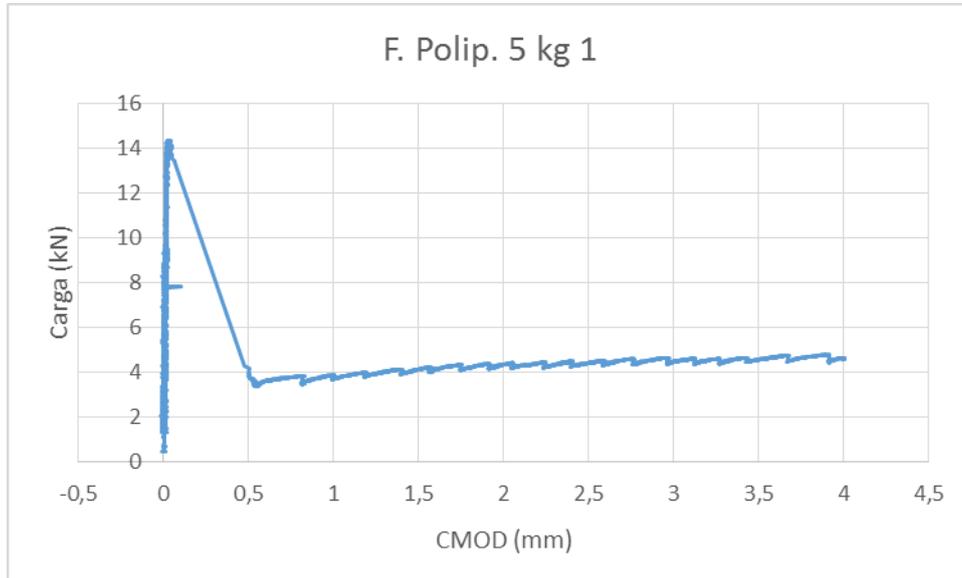


Figura 66. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-1

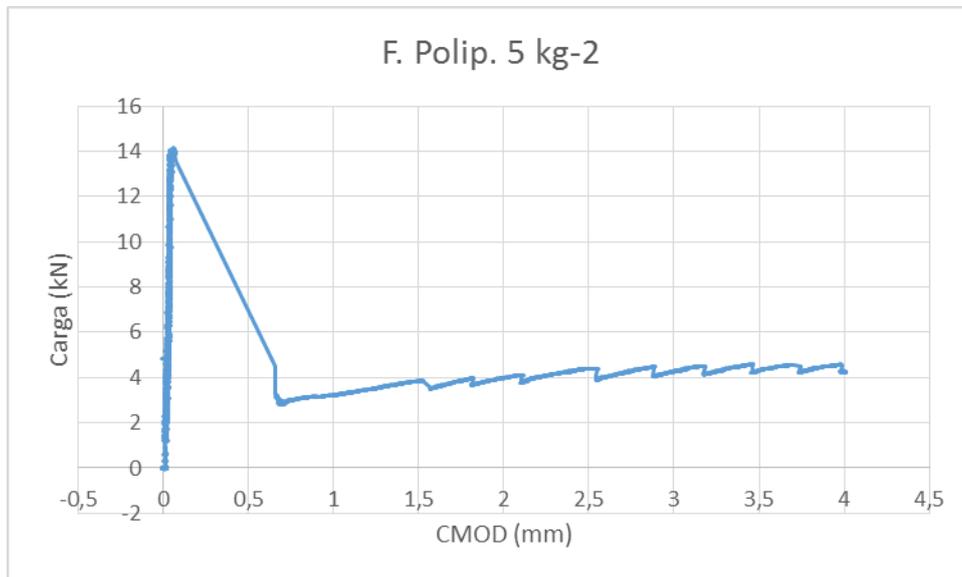


Figura 67. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-2

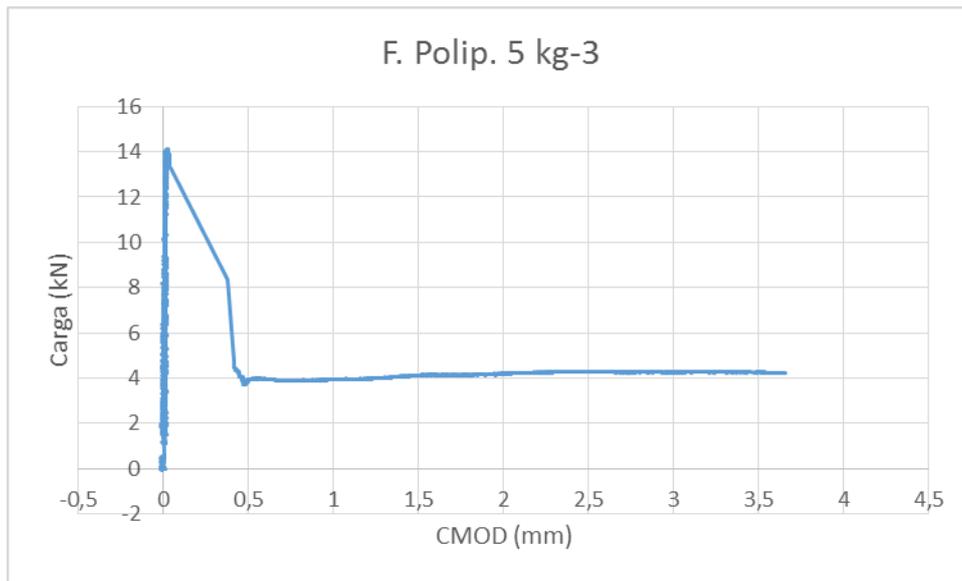


Figura 68. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-3

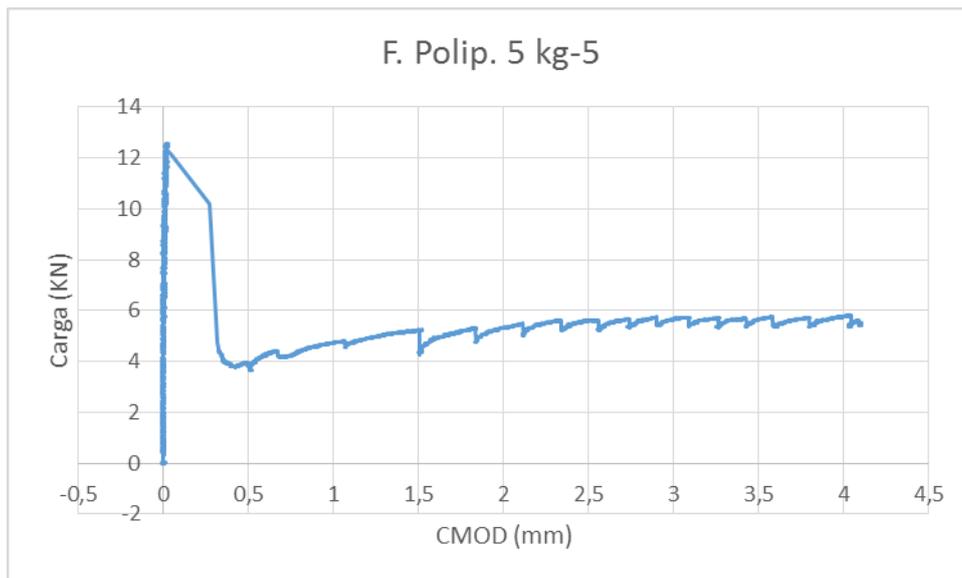


Figura 69. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-4

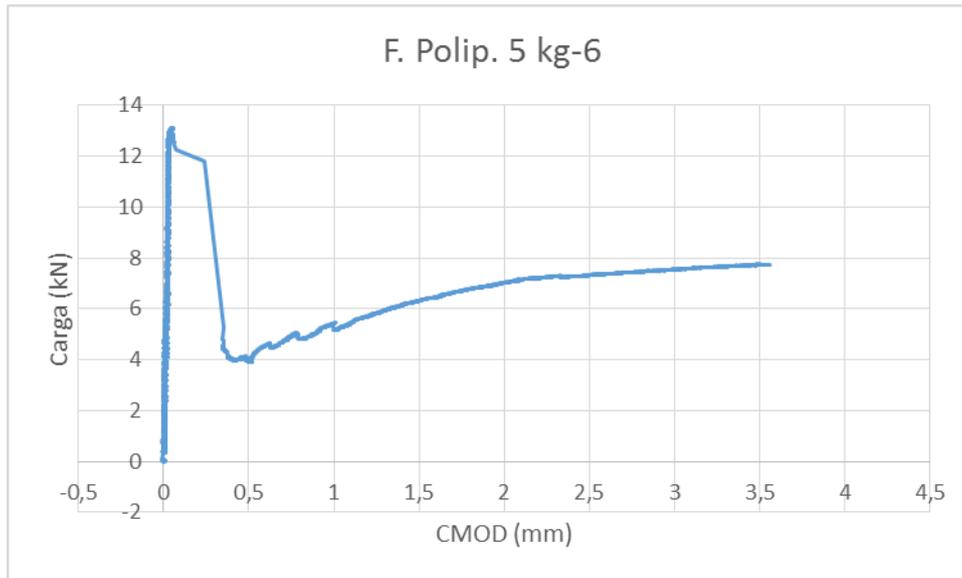


Figura 70. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-6

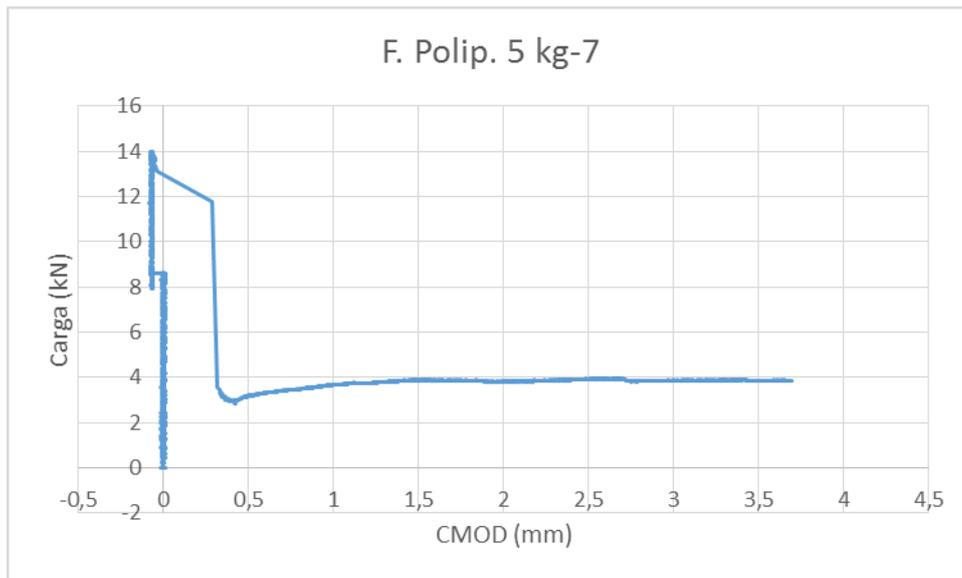


Figura 71. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-7

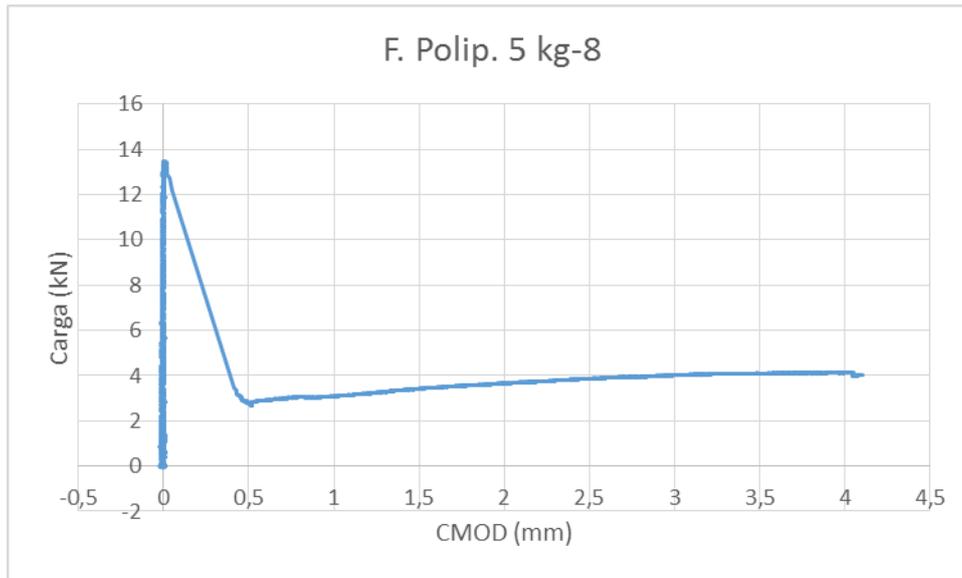


Figura 72. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-8

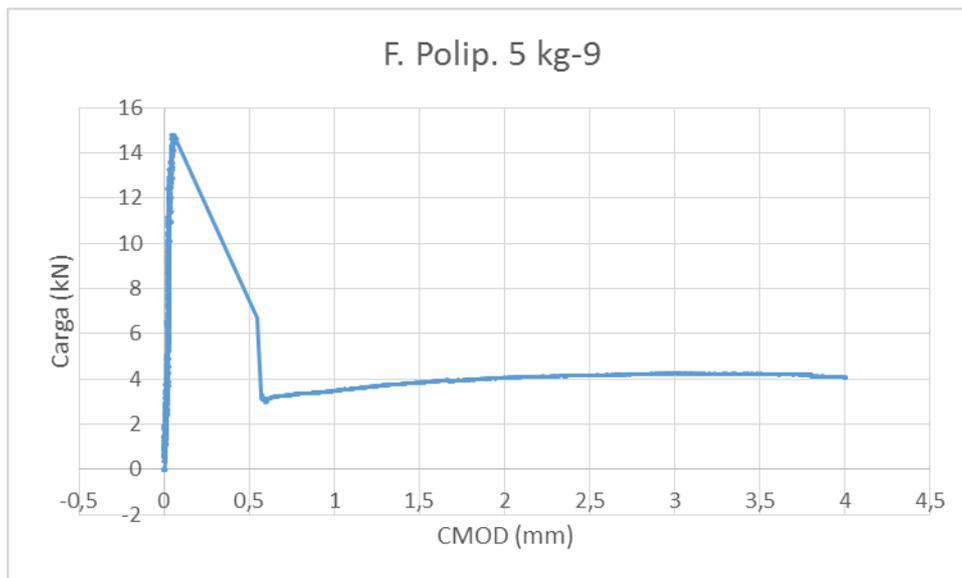


Figura 73. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-9

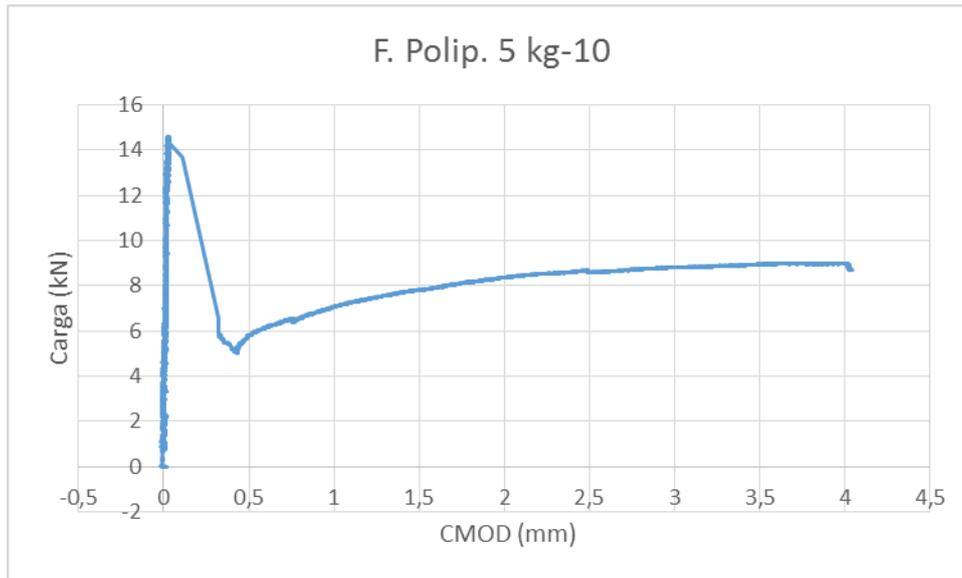


Figura 74. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 5kg-10

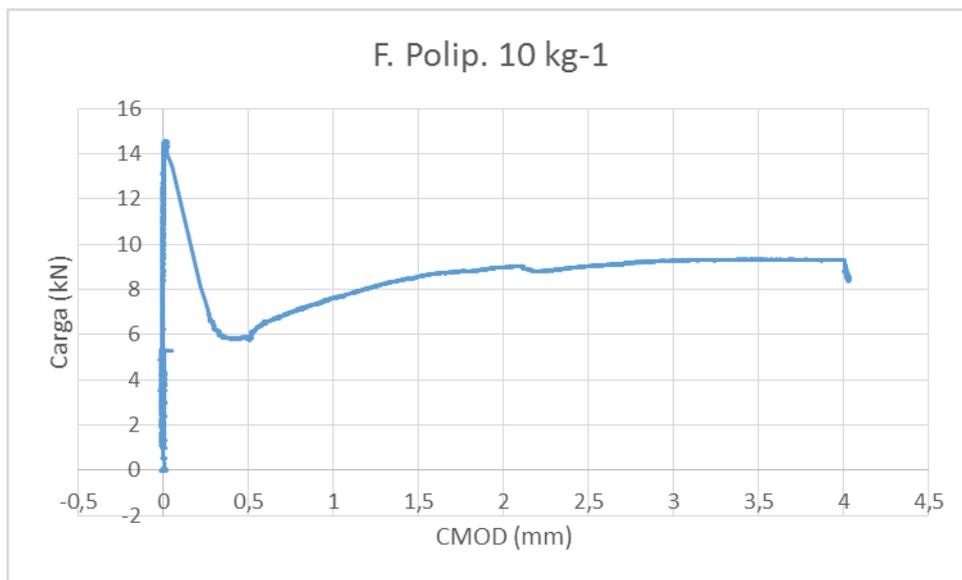


Figura 75. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-1

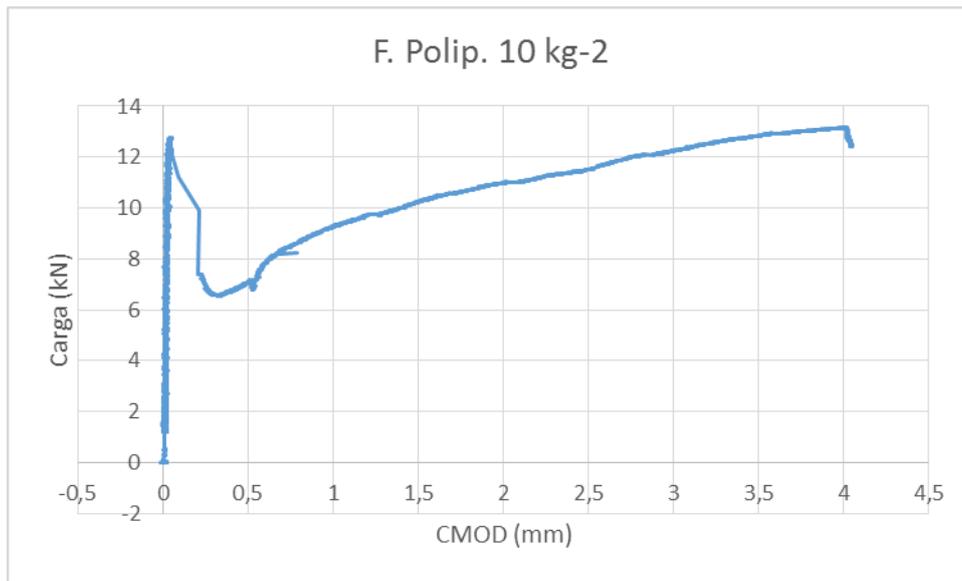


Figura 76. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-2

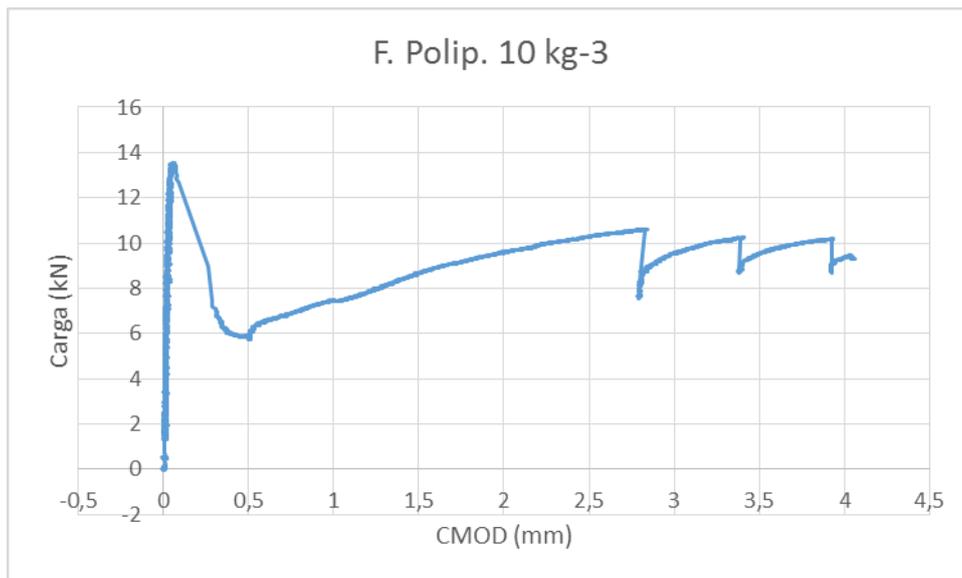


Figura 77. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-3

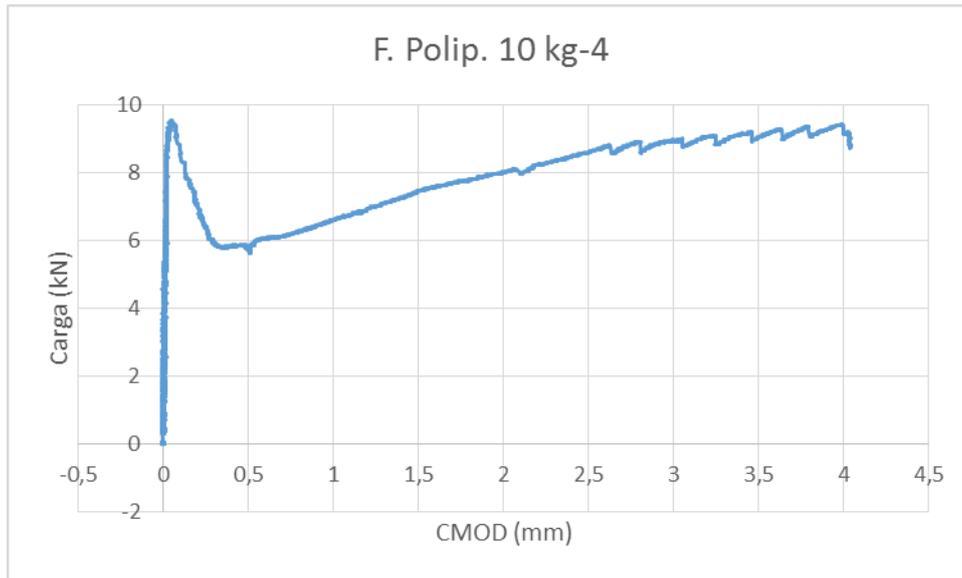


Figura 78. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-4

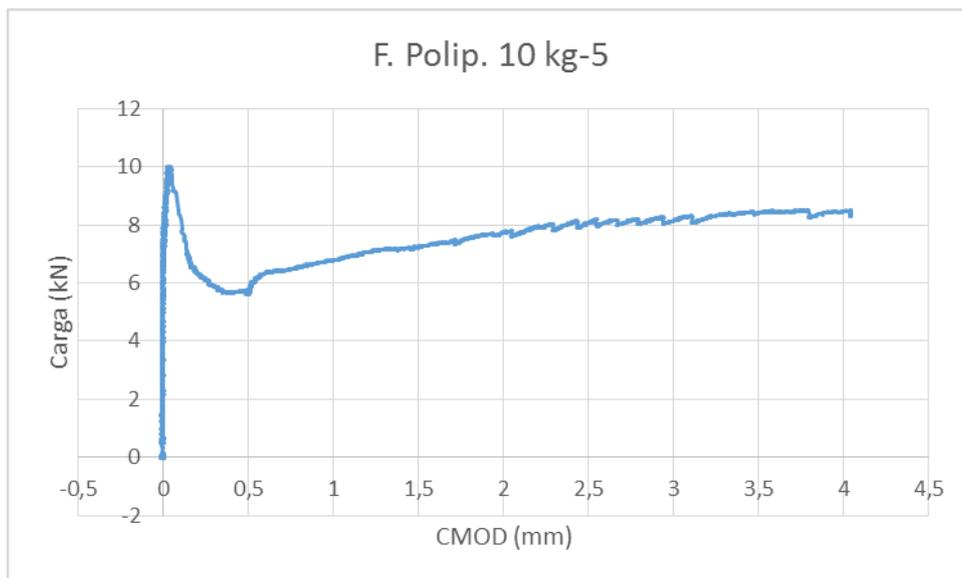


Figura 79. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-5

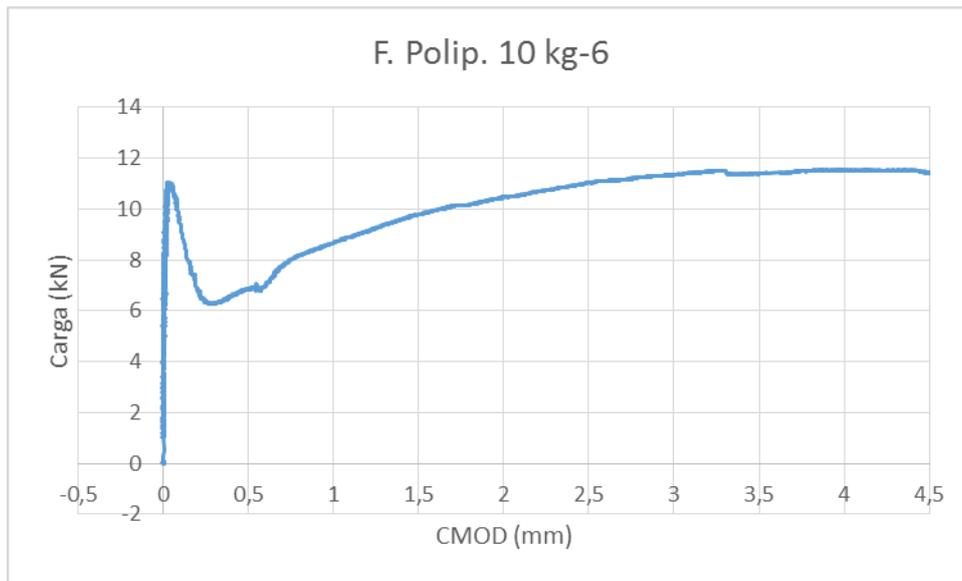


Figura 80. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-6

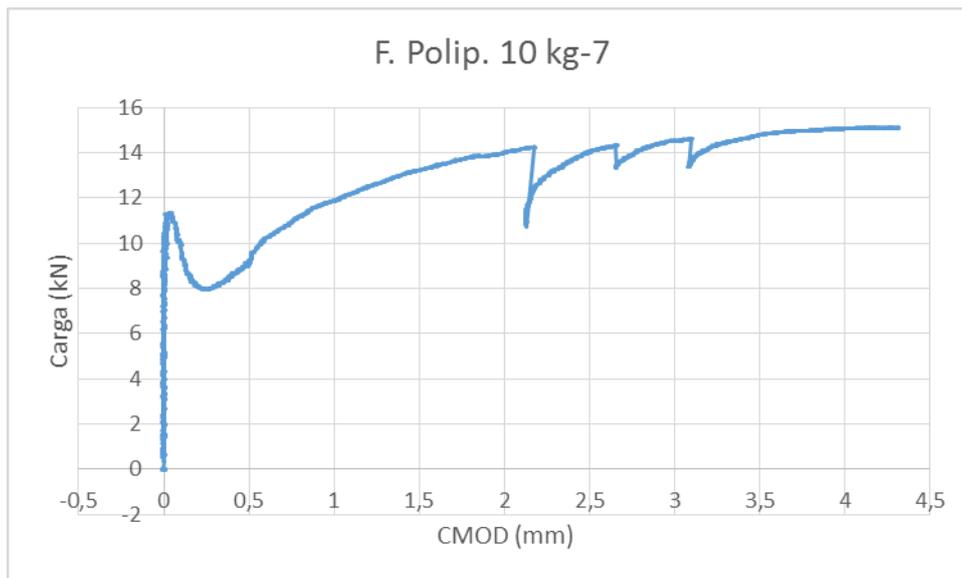


Figura 81. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-7

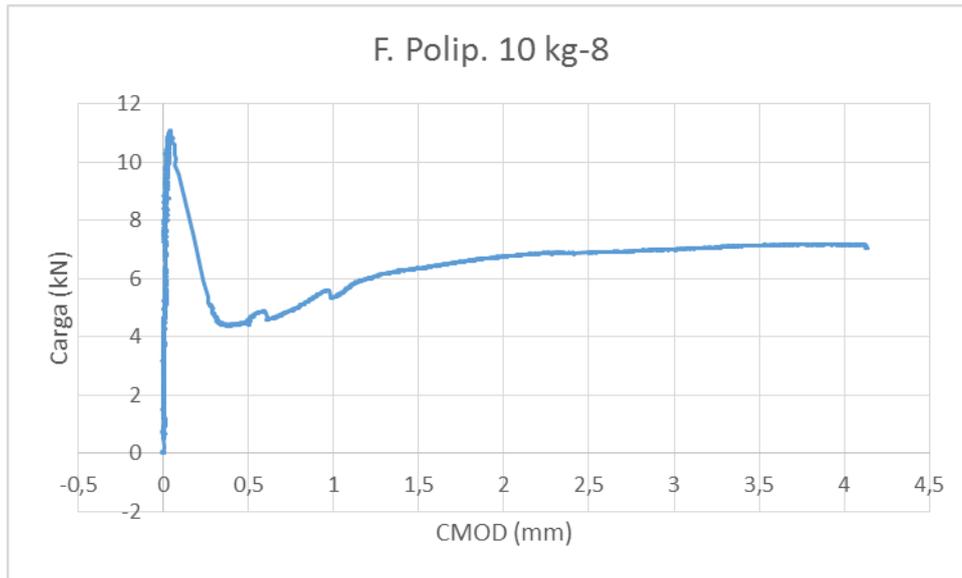


Figura 82. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-8

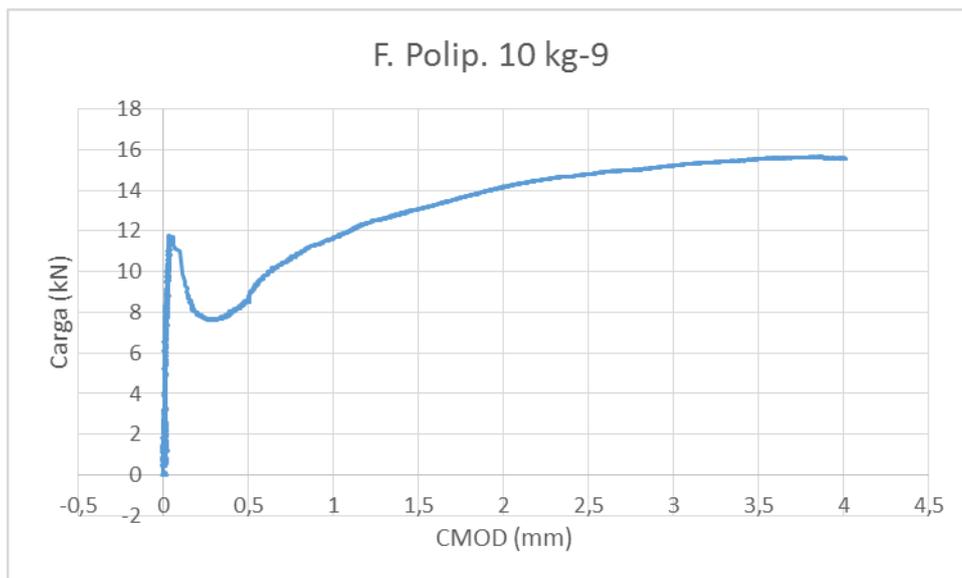


Figura 83. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FP 10kg-9

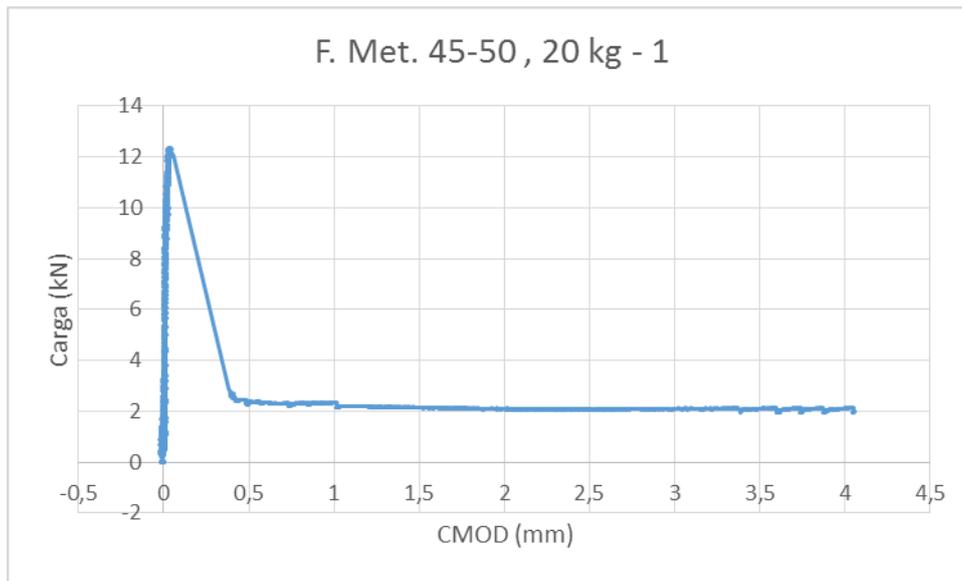


Figura 84. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-1

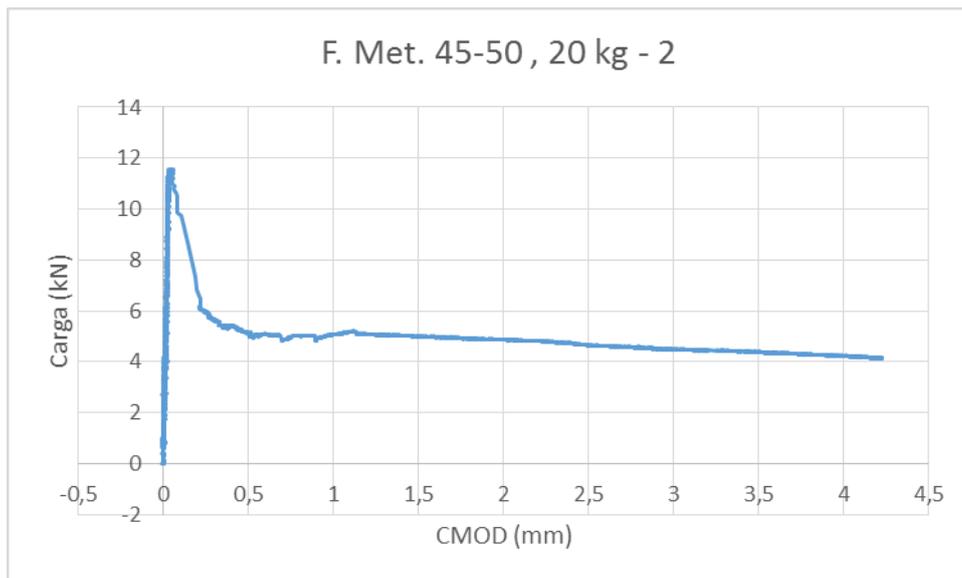


Figura 85. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-2

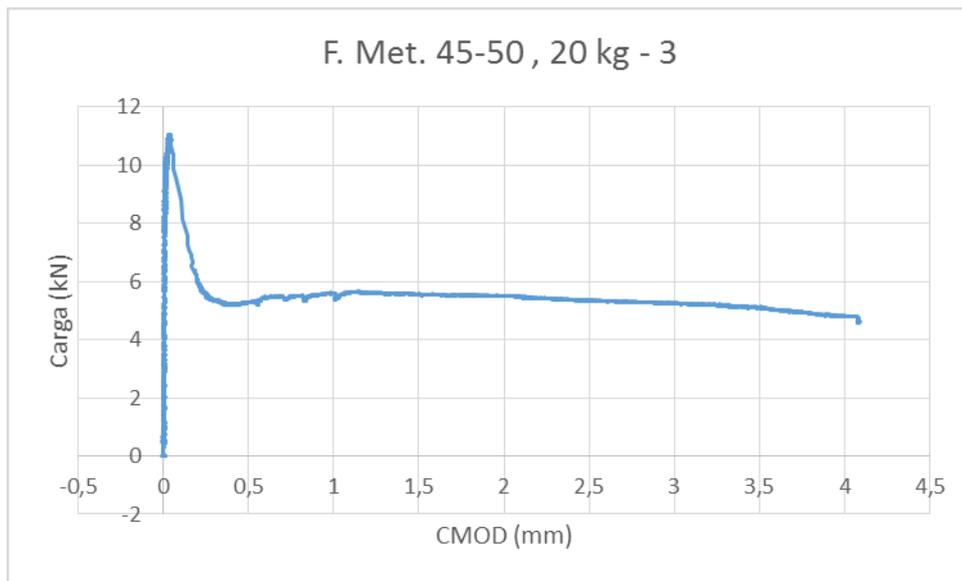


Figura 86. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-3

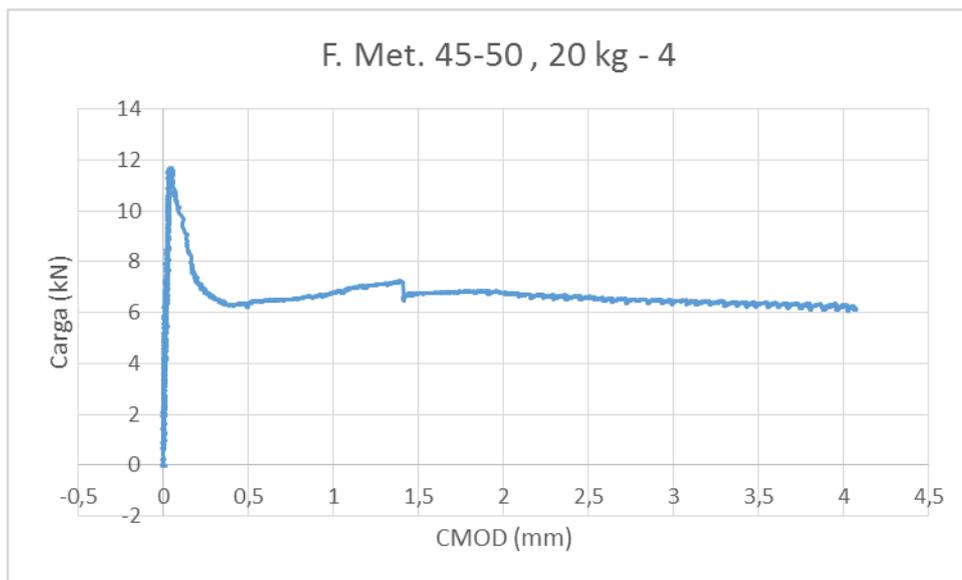


Figura 87. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-4

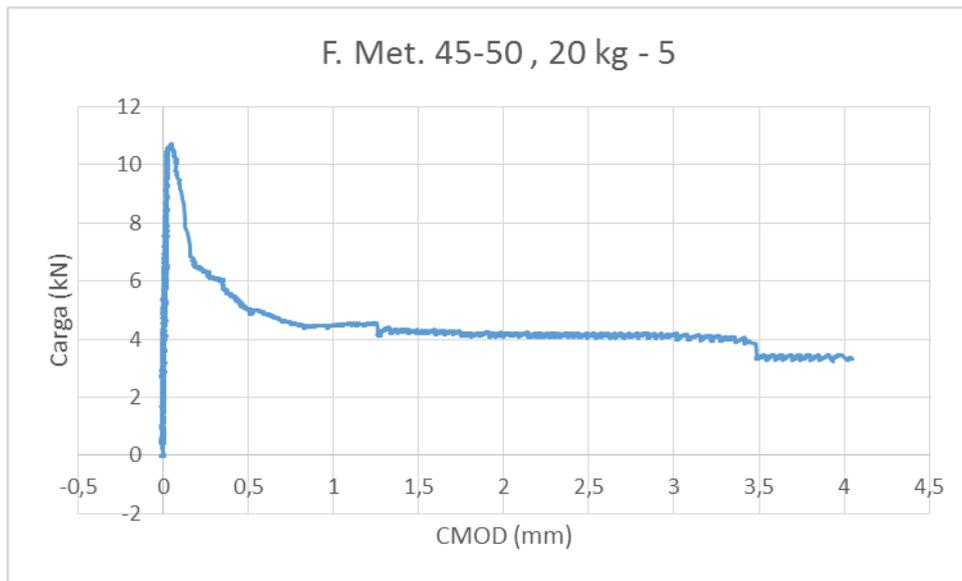


Figura 88. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-5

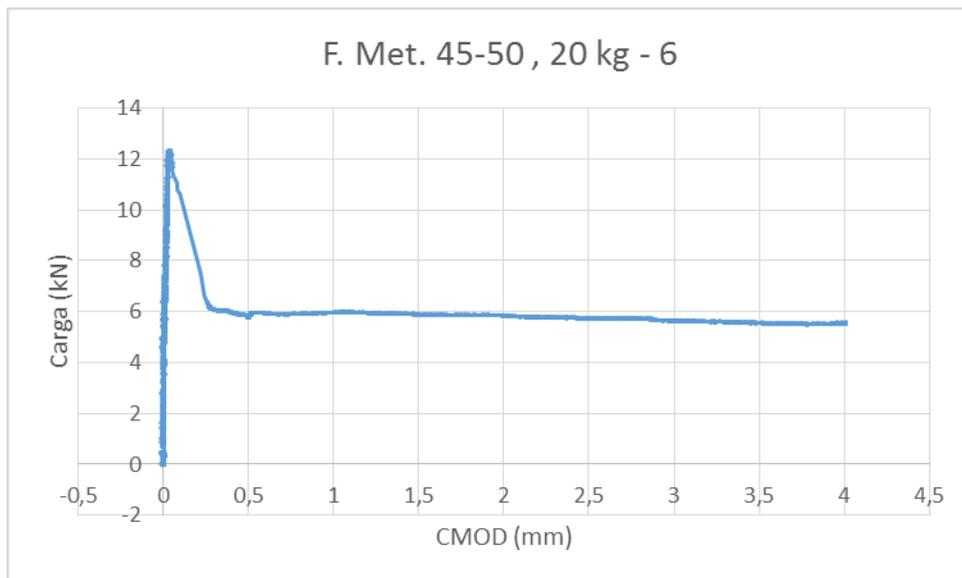


Figura 89. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-6

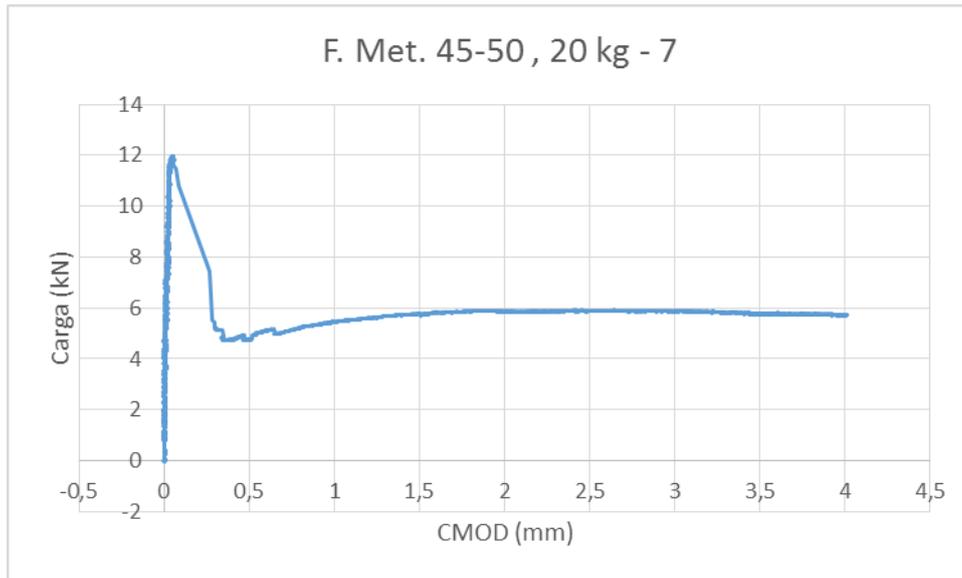


Figura 90. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-7

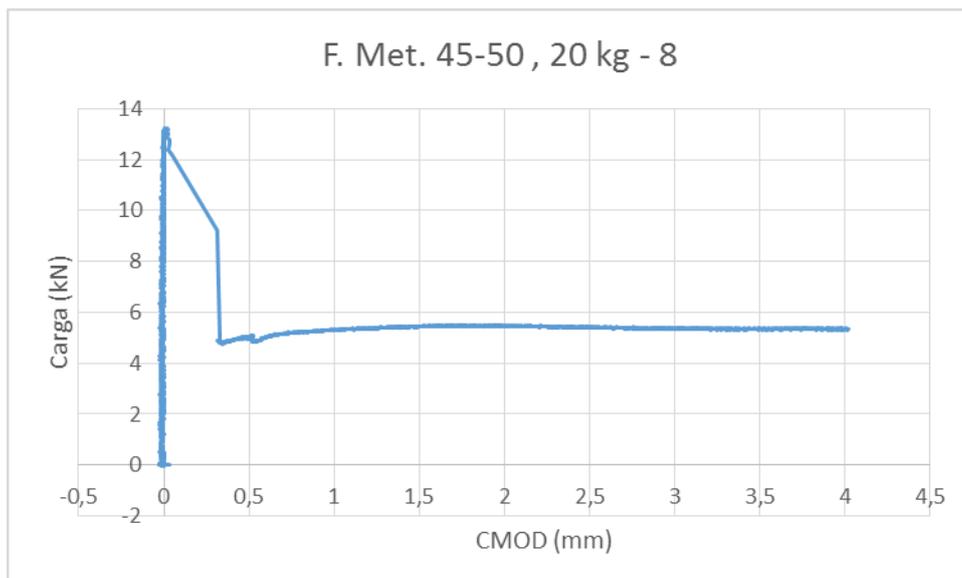


Figura 91. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-8

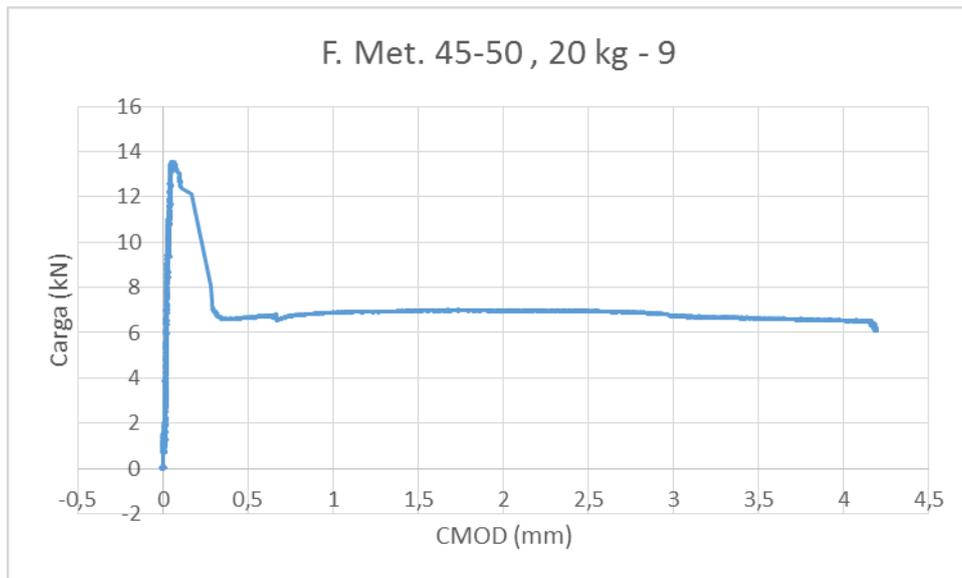


Figura 92. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 45/50-9

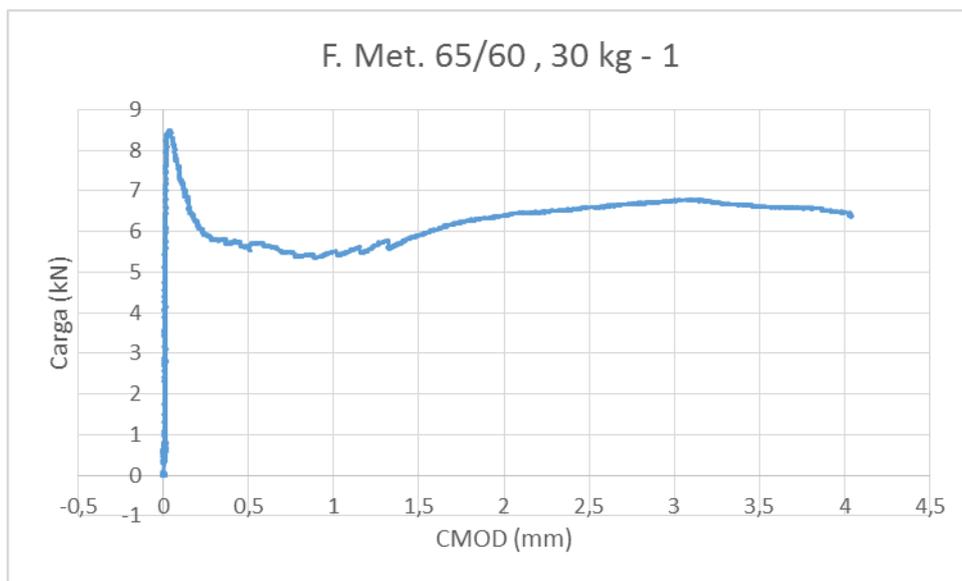


Figura 93. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-1

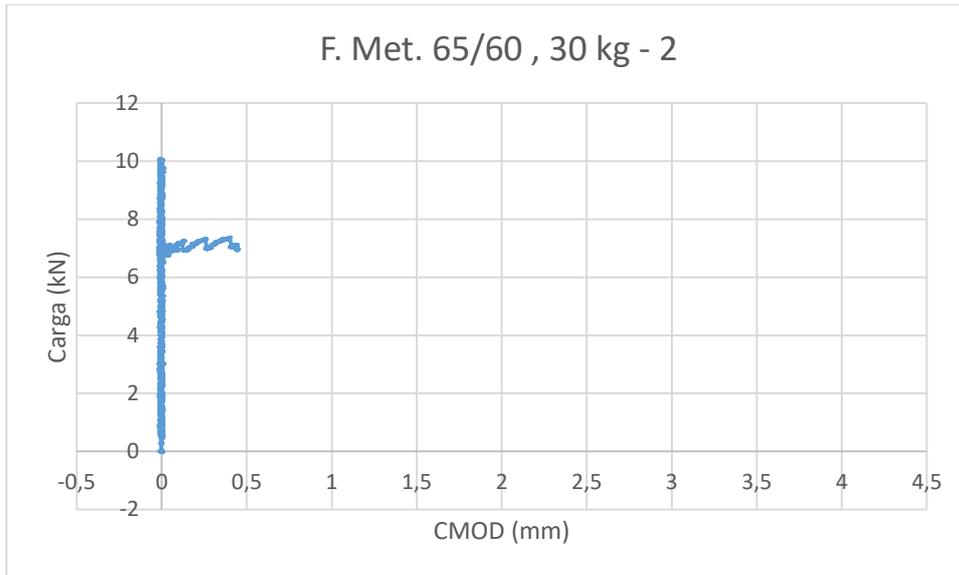


Figura 94. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-2

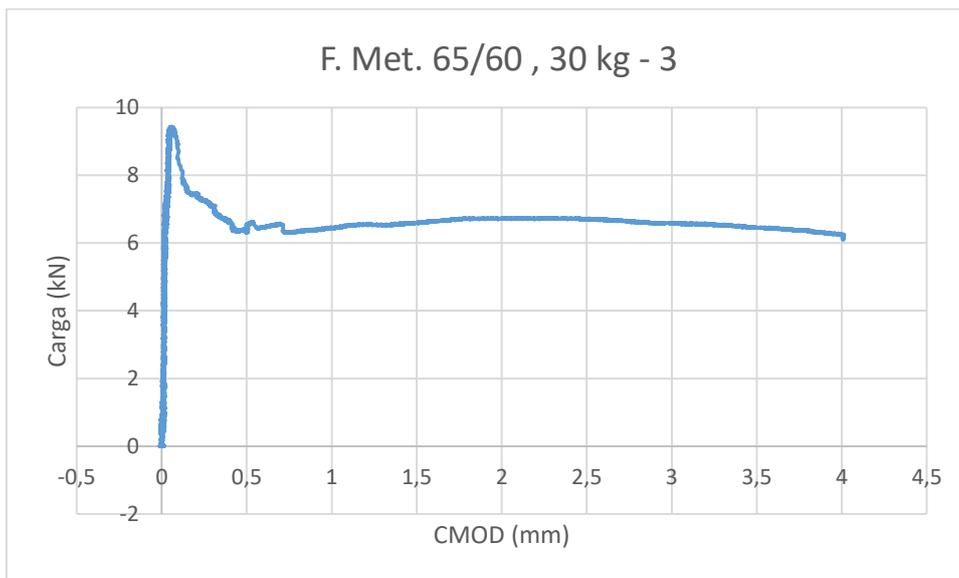


Figura 95. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-3

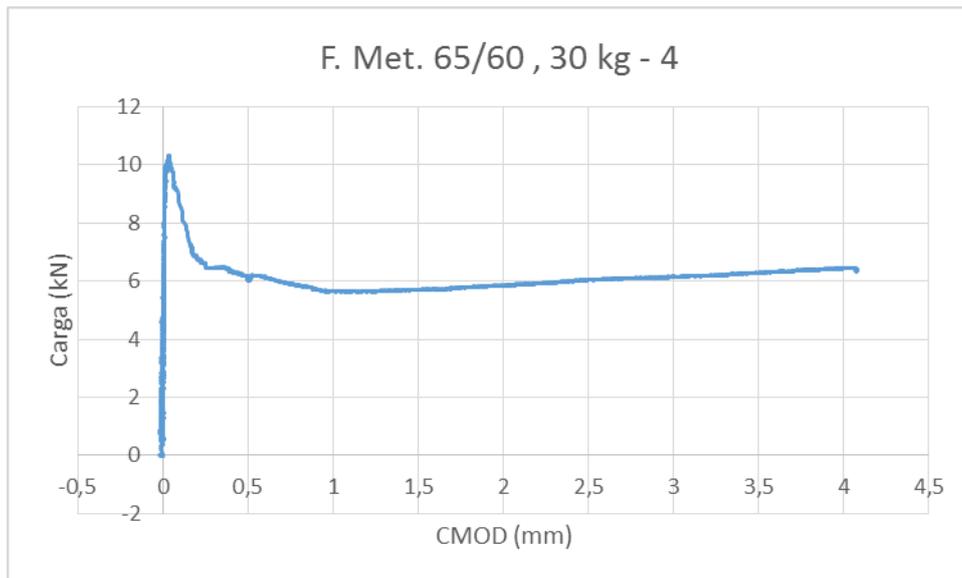


Figura 96. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-4

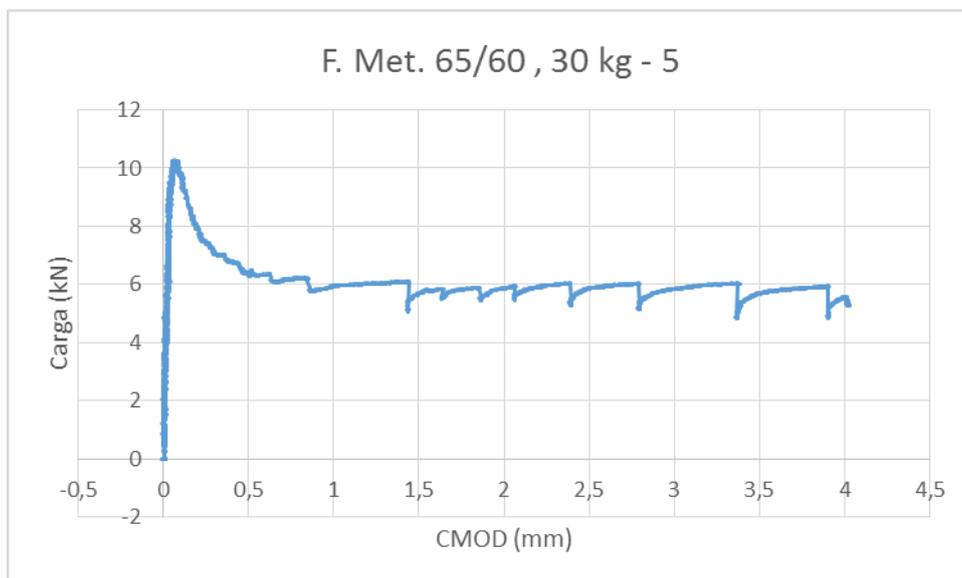


Figura 97. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-5

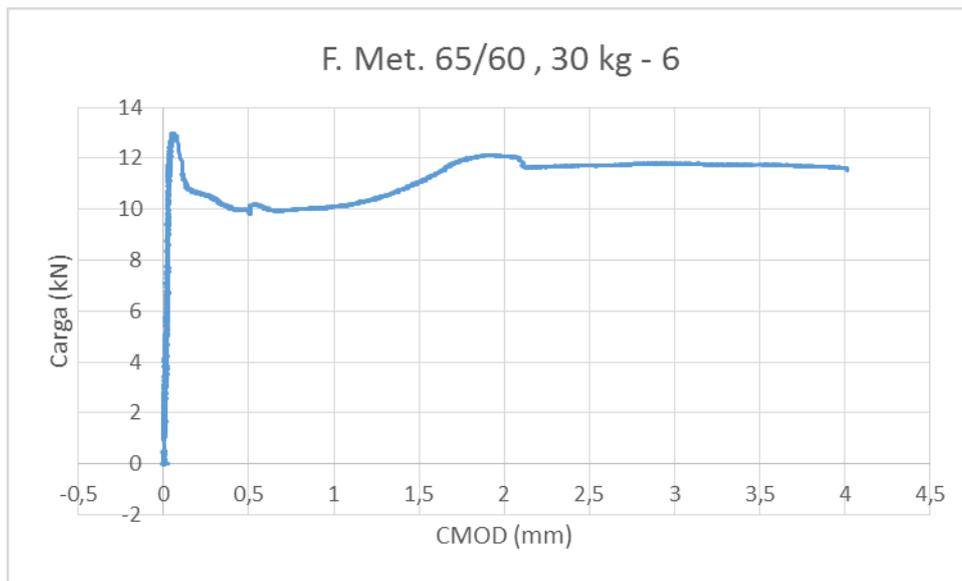


Figura 98. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-6

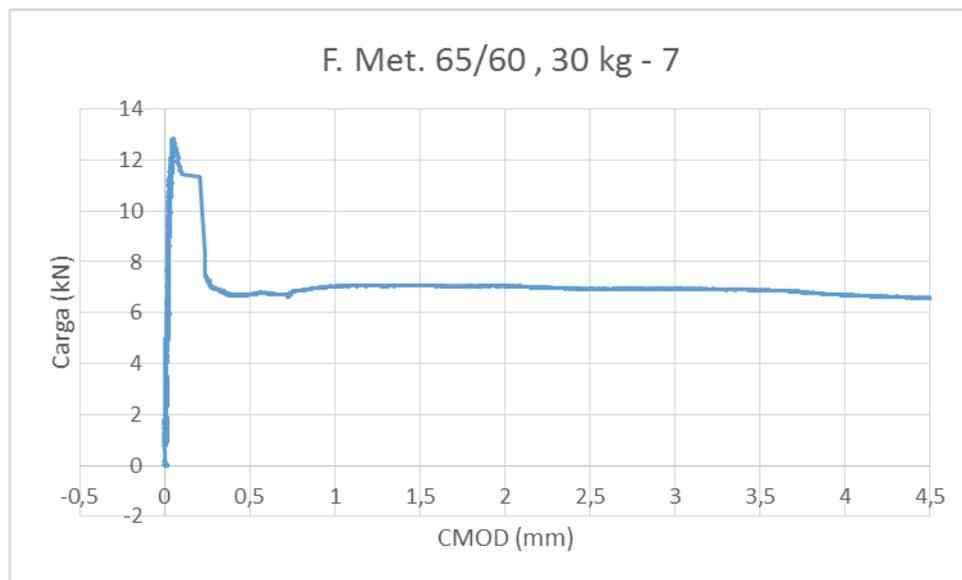


Figura 99. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-7

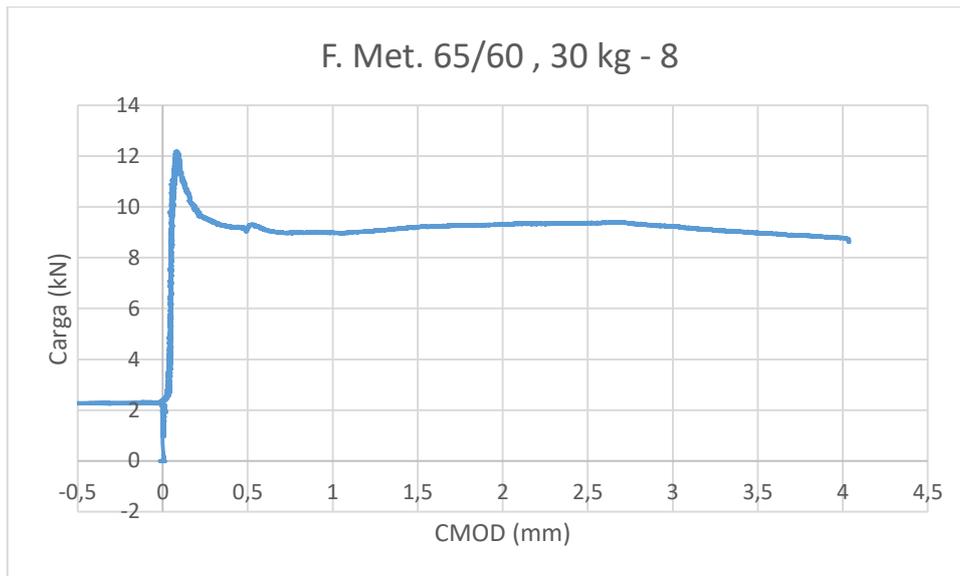


Figura 100. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-8

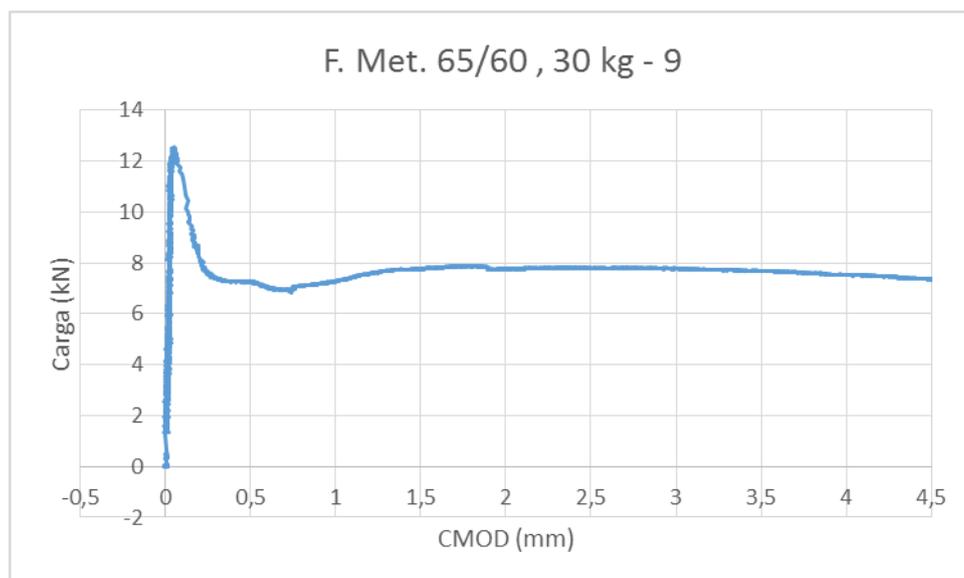


Figura 101. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con FM 65/60-9

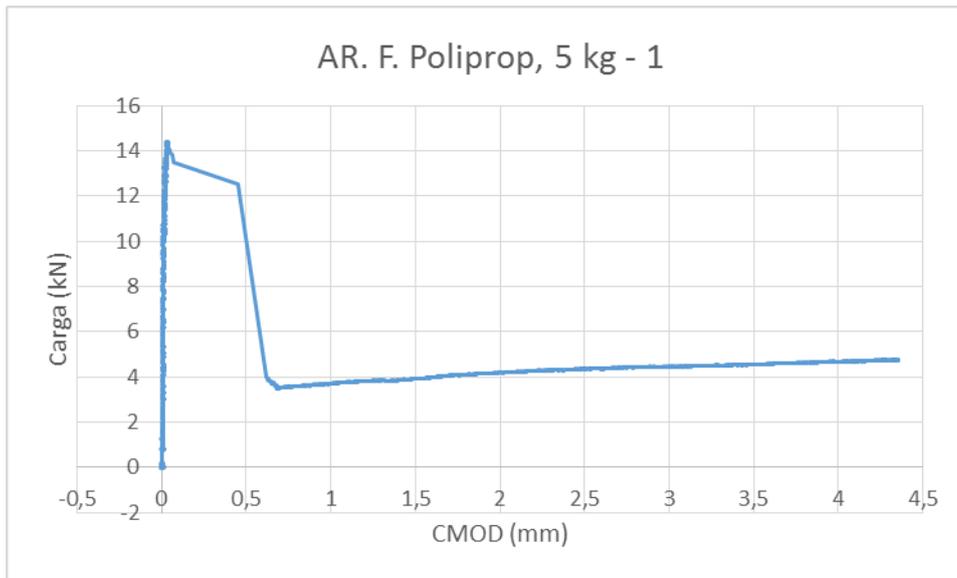


Figura 102. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FP5kg-1

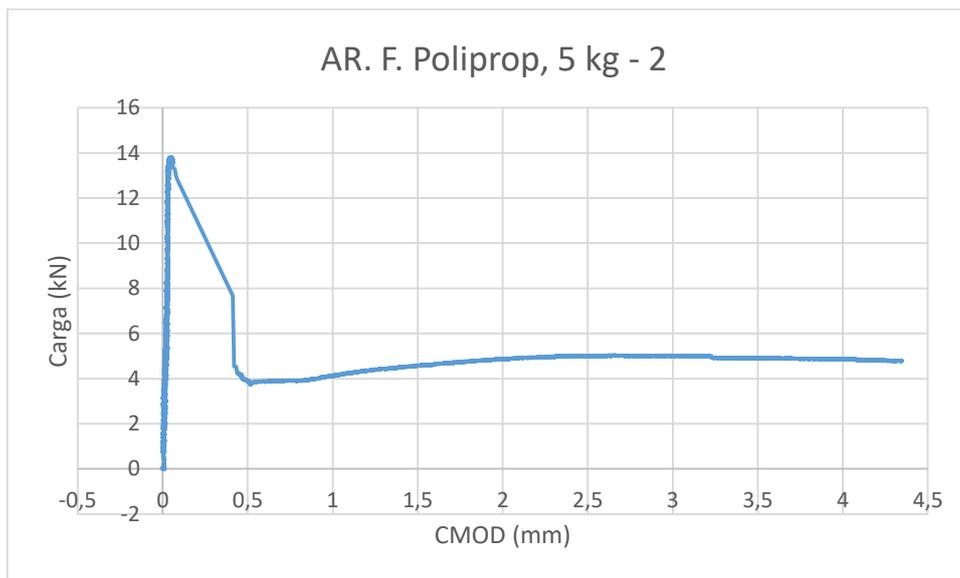


Figura 103. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FP5kg-2

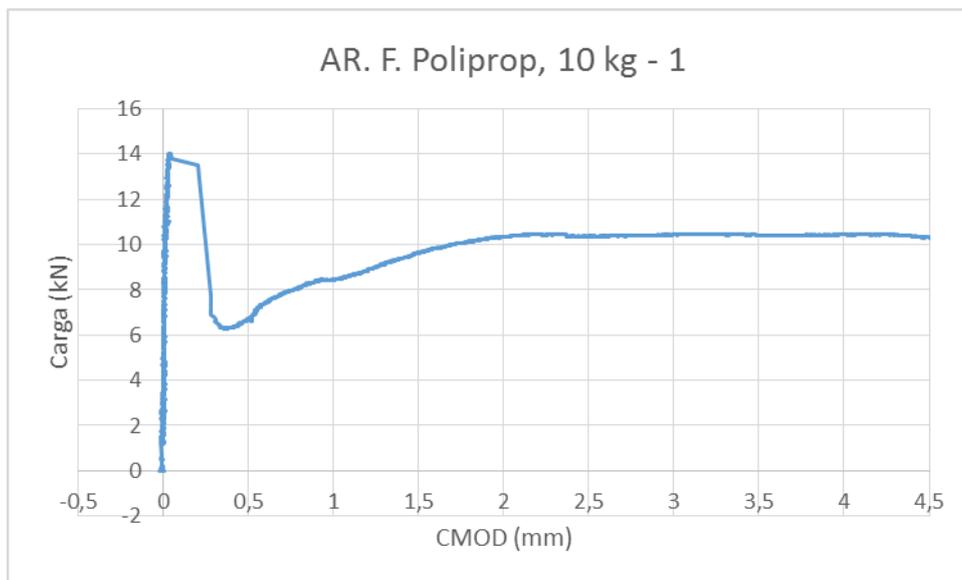


Figura 104. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FP10kg-1

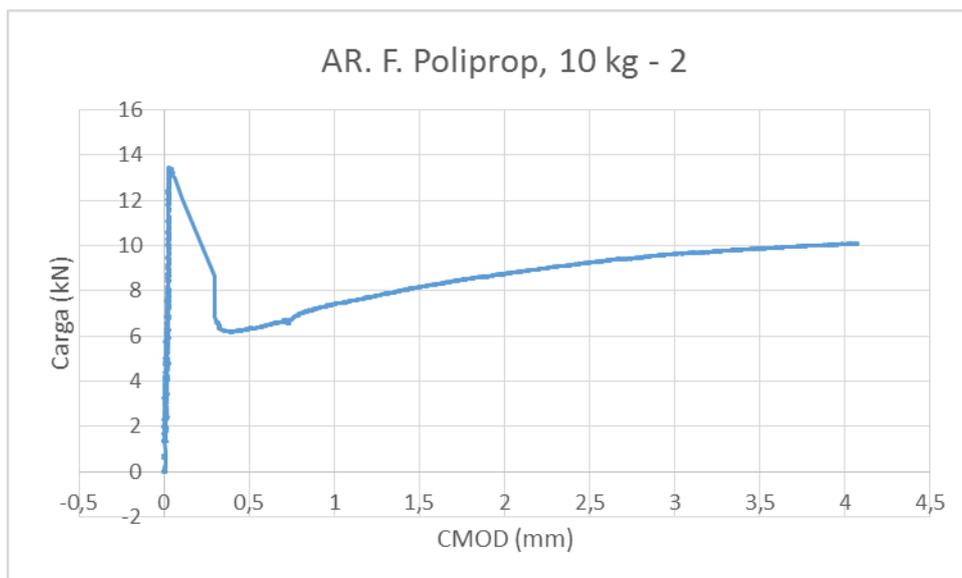


Figura 105. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FP10kg-2

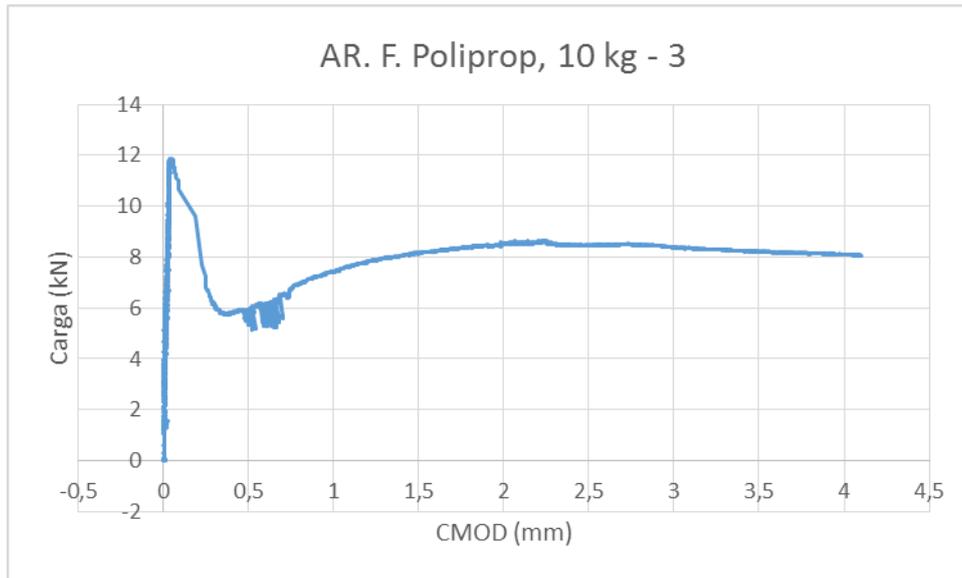


Figura 106. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FP10kg-3

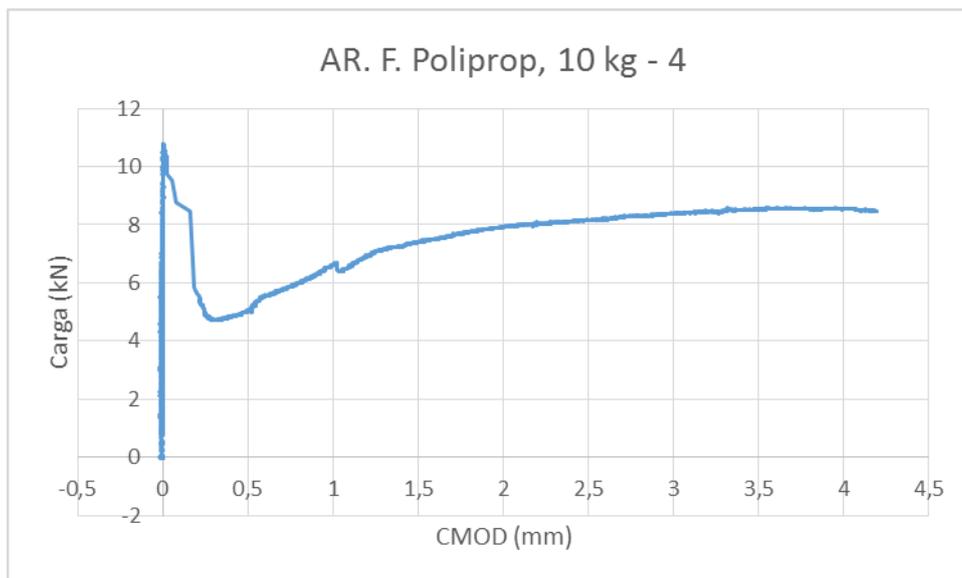


Figura 107. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FP10kg-4

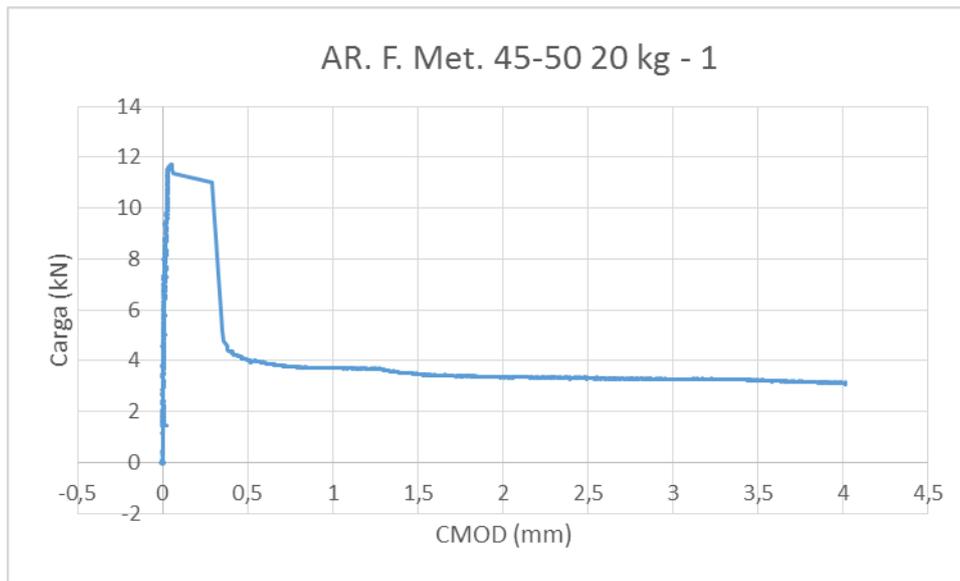


Figura 108. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 45/50-1

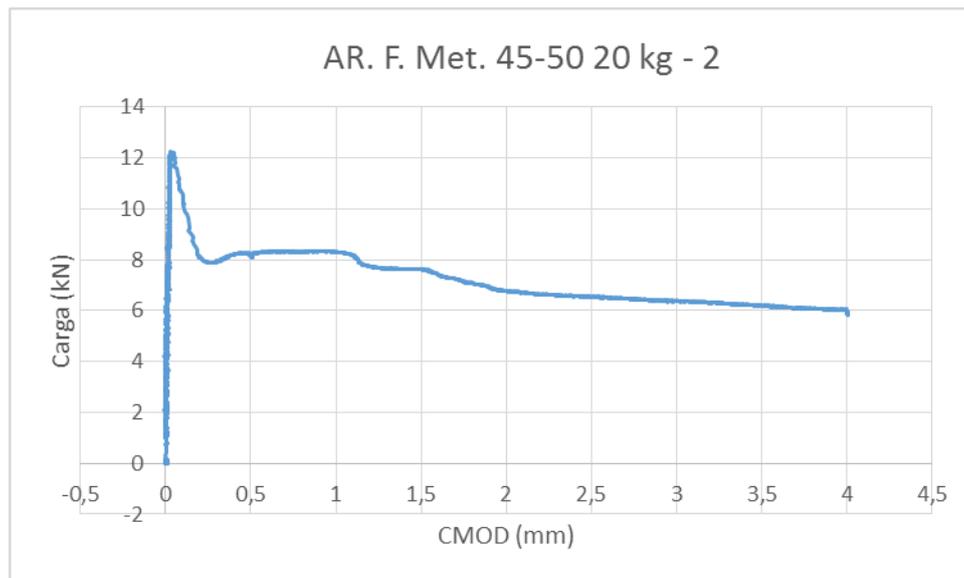


Figura 109. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 45/50-2

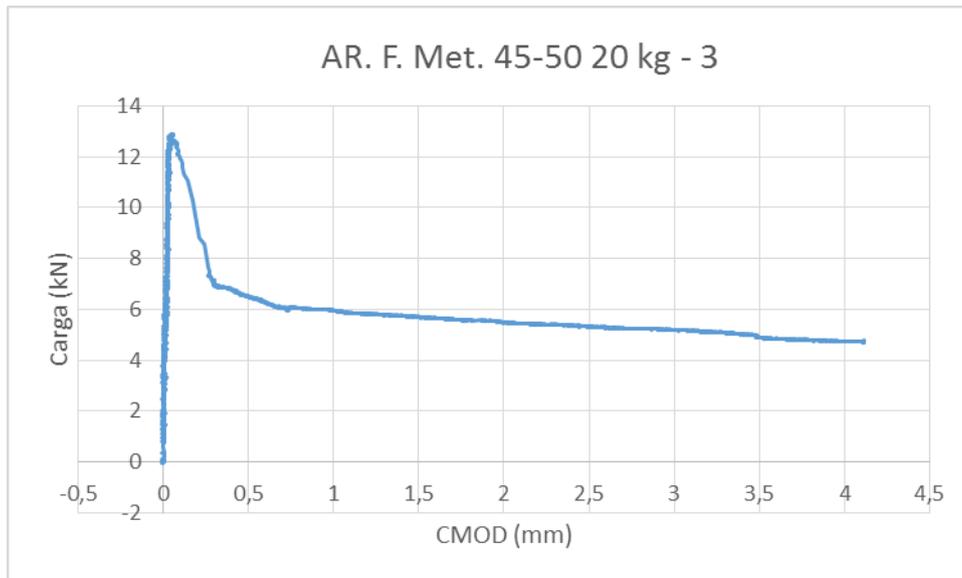


Figura 110. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 45/50-3

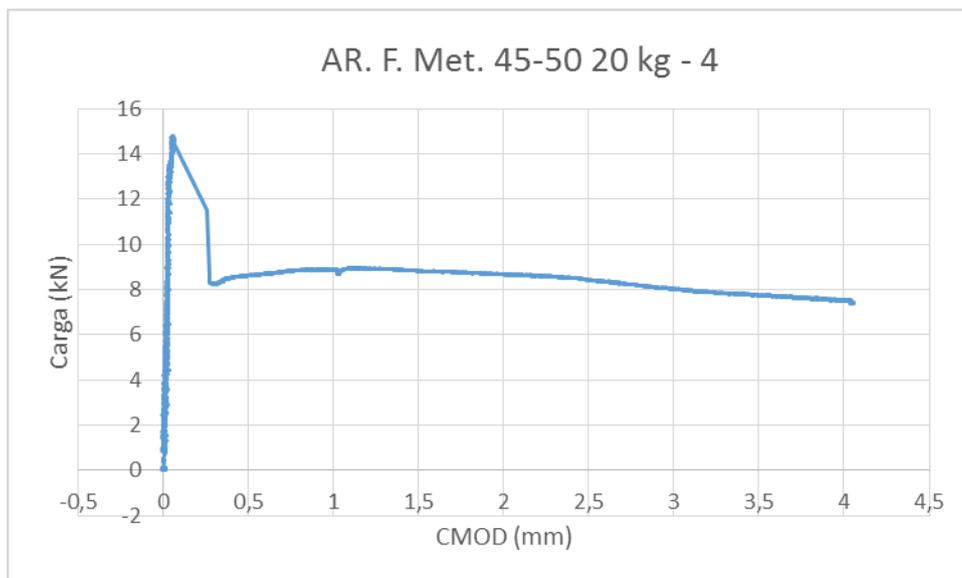


Figura 111. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 45/50-4

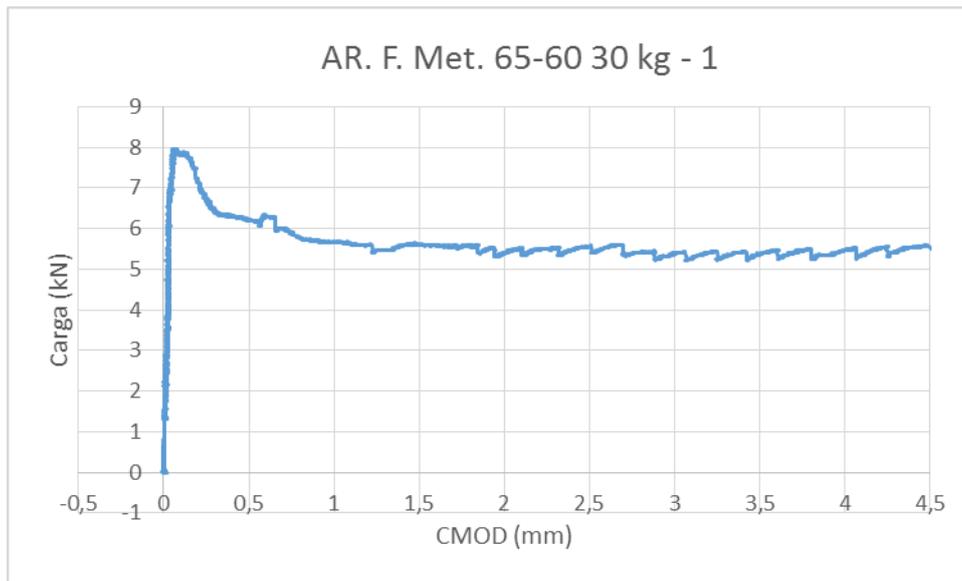


Figura 112. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 65/60-1

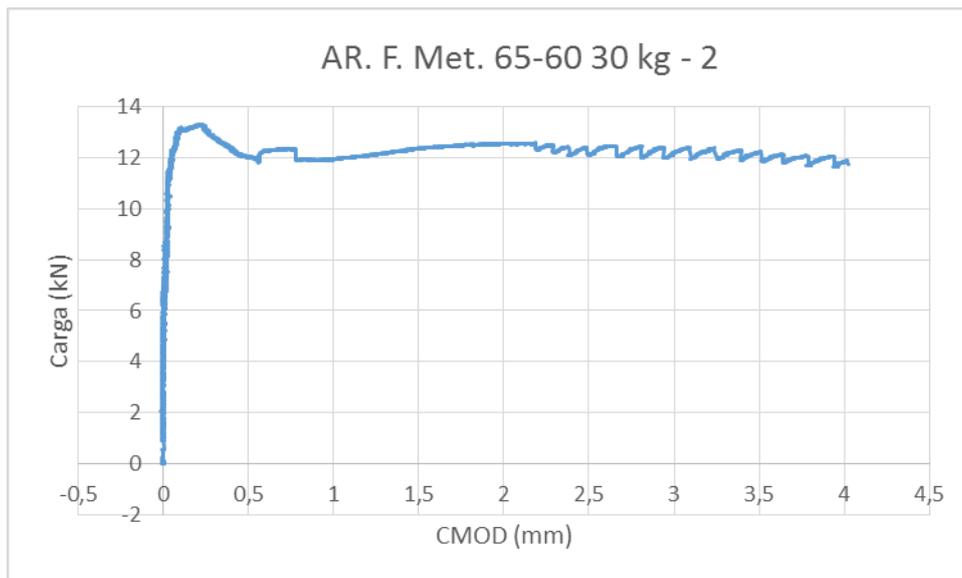


Figura 113. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 65/60-2

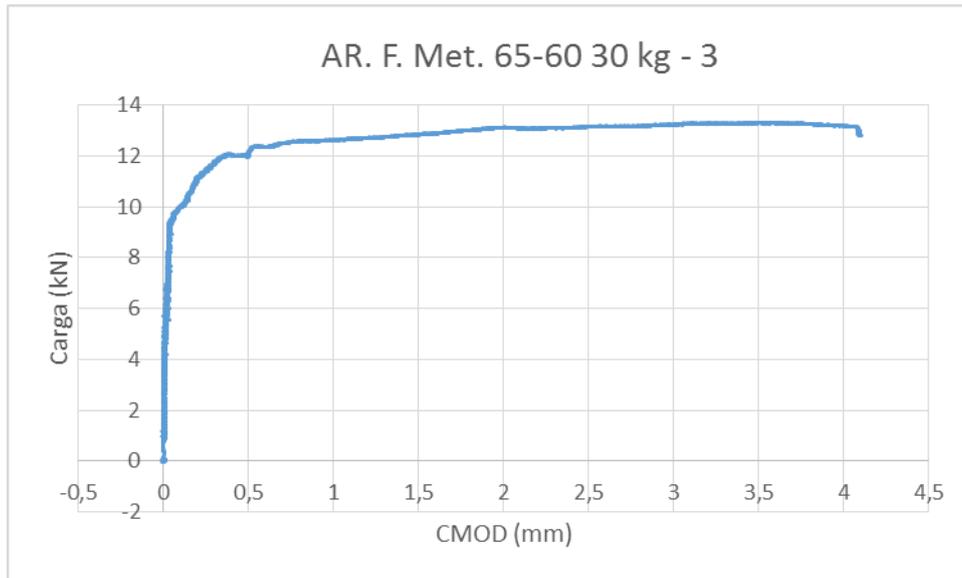


Figura 114. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 65/60-3

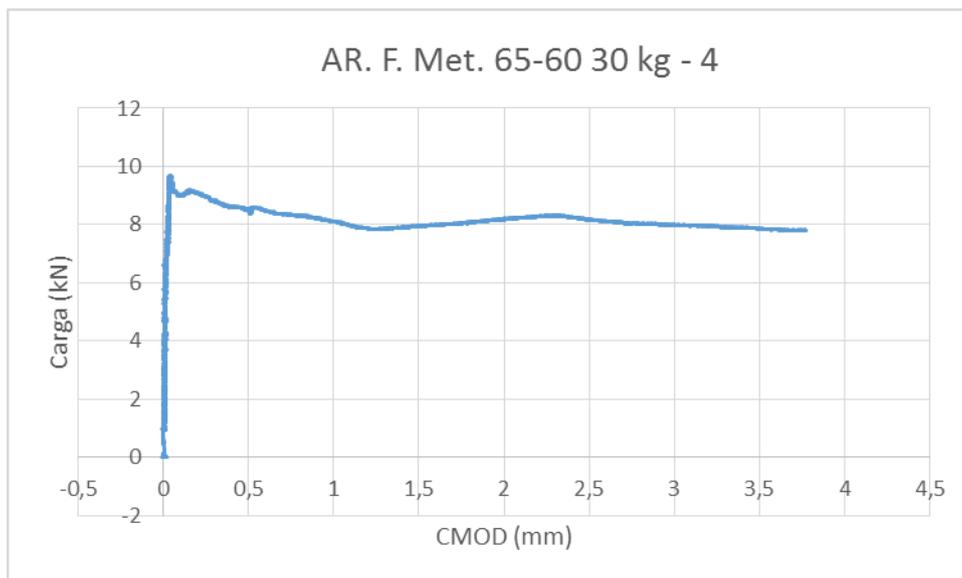


Figura 115. Gráfica carga/flecha del ensayo de flexotracción a tres puntos con AR FM 65/60-4

7.4. Fotografías de probetas prismáticas ensayadas a flexotracción

7.4.1. Probetas con FP-5kg





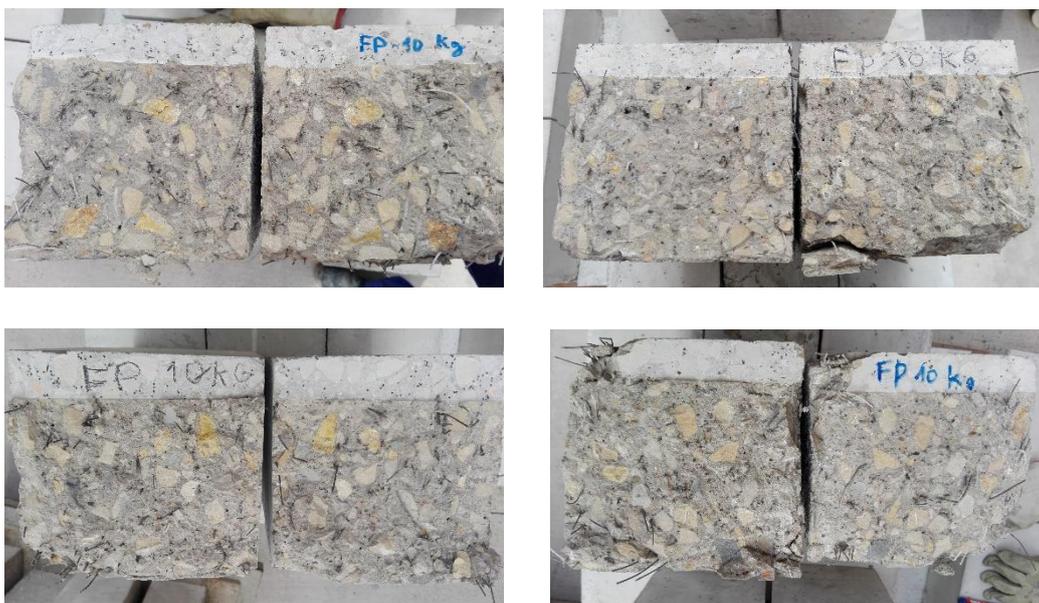
Figura 116. Sección de probetas de hormigón con FP-5kg

7.4.2. Probetas con AR-FP-5KG



Figura 117. Sección de probetas de hormigón con AR-FP-5kg

7.4.3. Probetas con FP-10kg



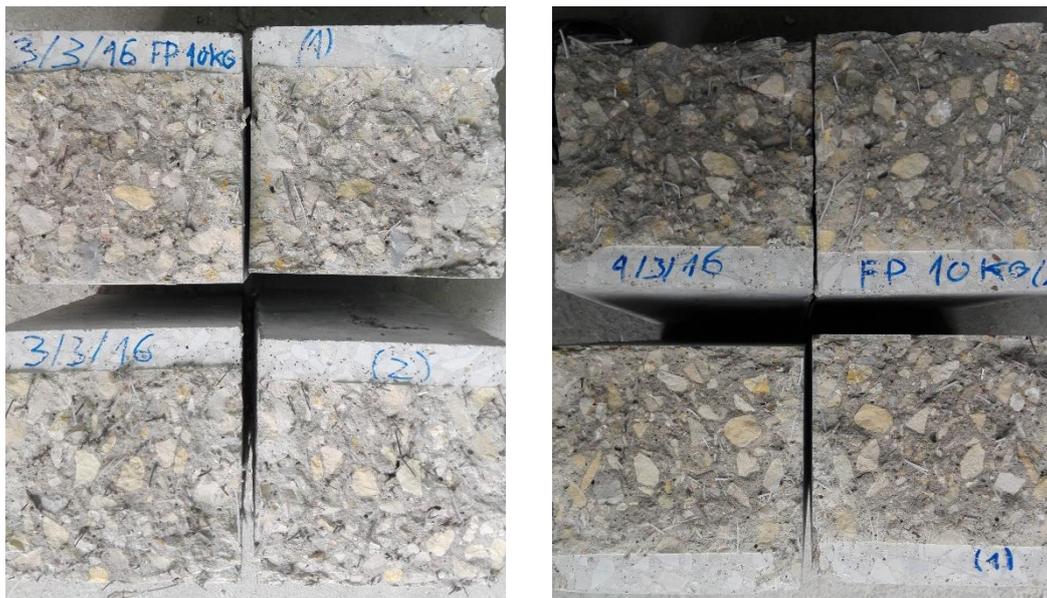


Figura 118. Sección de probetas de hormigón con FP-10kg

7.4.4. Probetas con AR-FP10KG



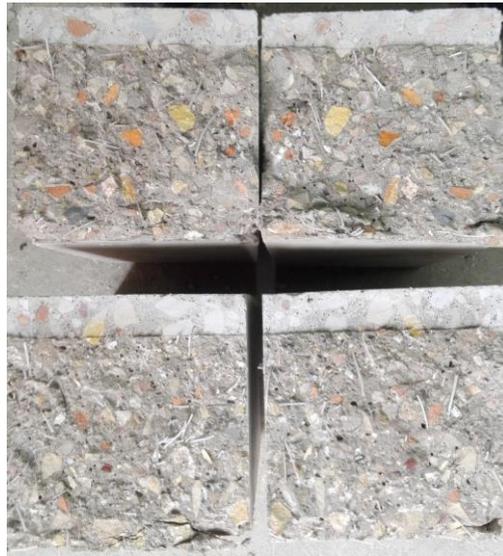


Figura 119. Sección de probetas de hormigón con AR-FP-10kg

7.4.5. Probetas con FM-45/50



Estudio técnico experimental de hormigones con fibras de polipropileno, fibras metálicas y áridos reciclados para su utilización en pavimentos de baja intensidad de tráfico.

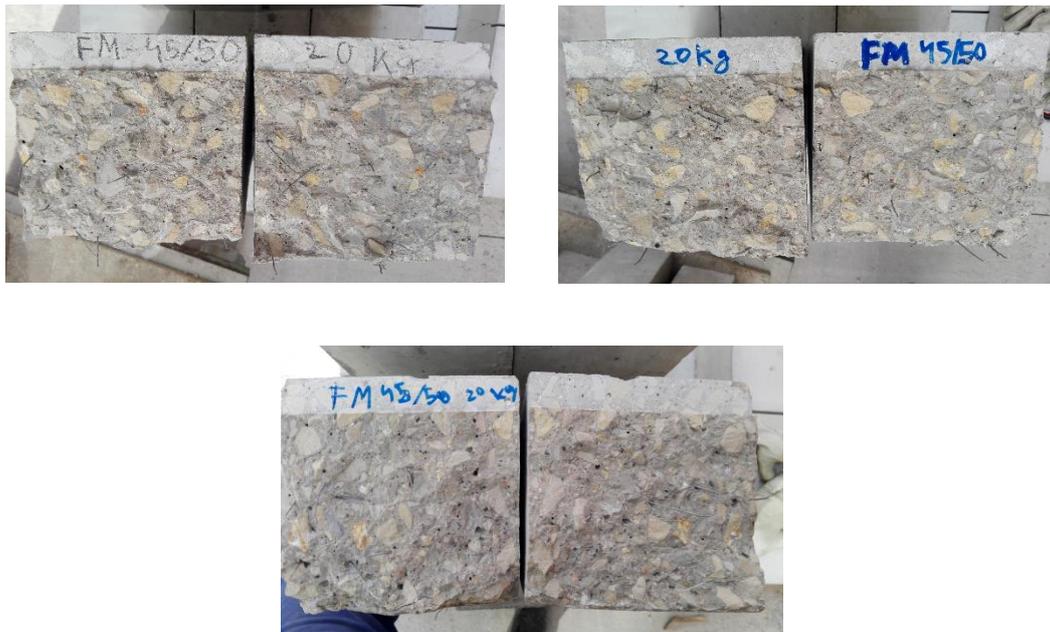


Figura 120. Sección de probetas de hormigón con FM-45/50

7.4.6. Probetas con AR-FM-45/50

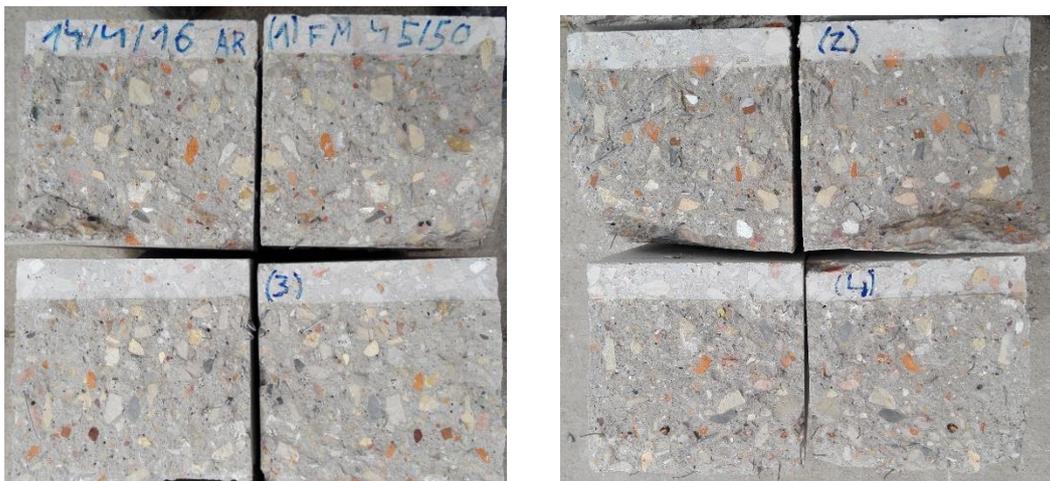


Figura 121. Sección de probetas de hormigón con AR-FM-45/50

7.4.7. Probetas con FM-65/60

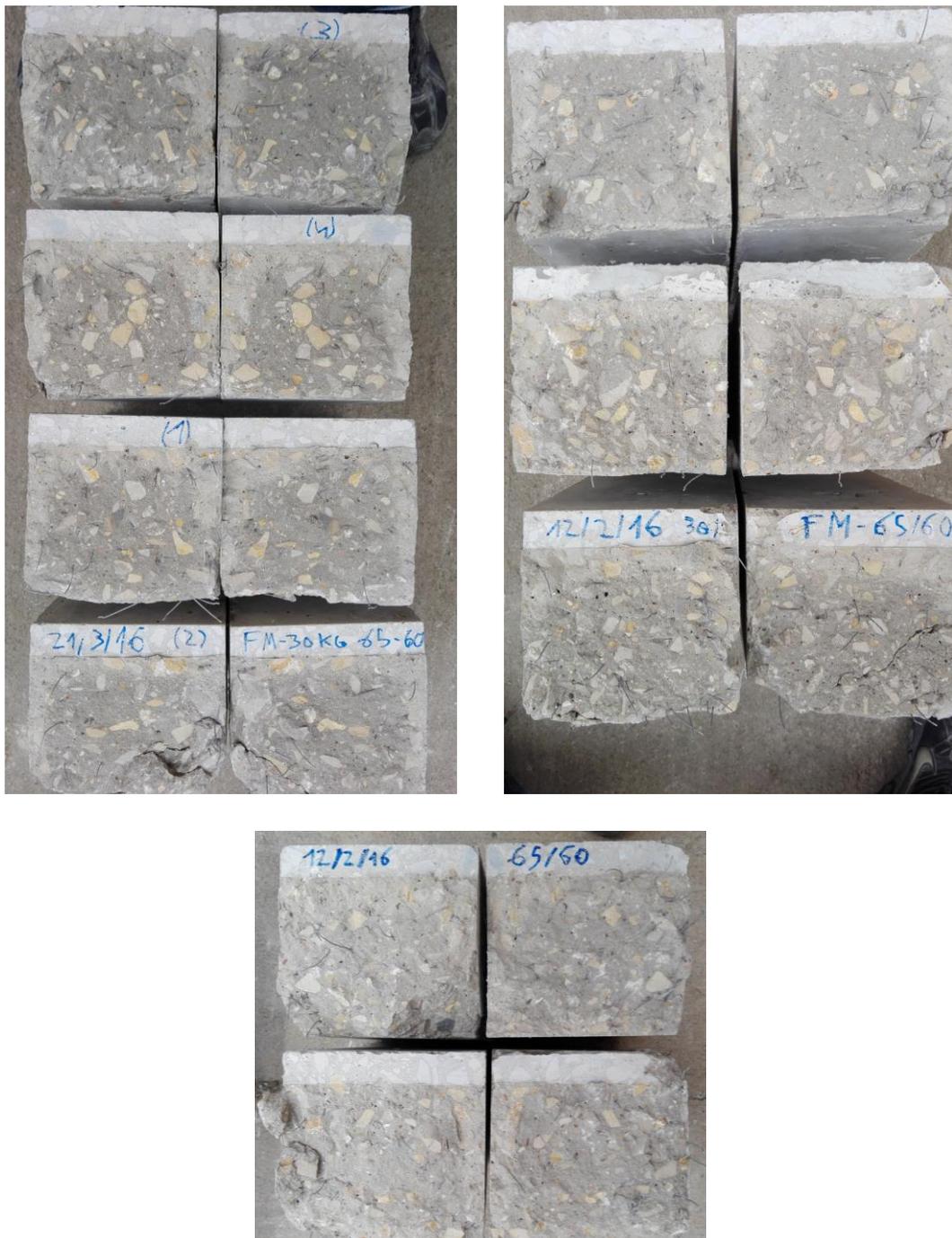


Figura 122. Sección de probetas de hormigón con FM-65/60

7.4.8. Probetas con AR-FM-65/60

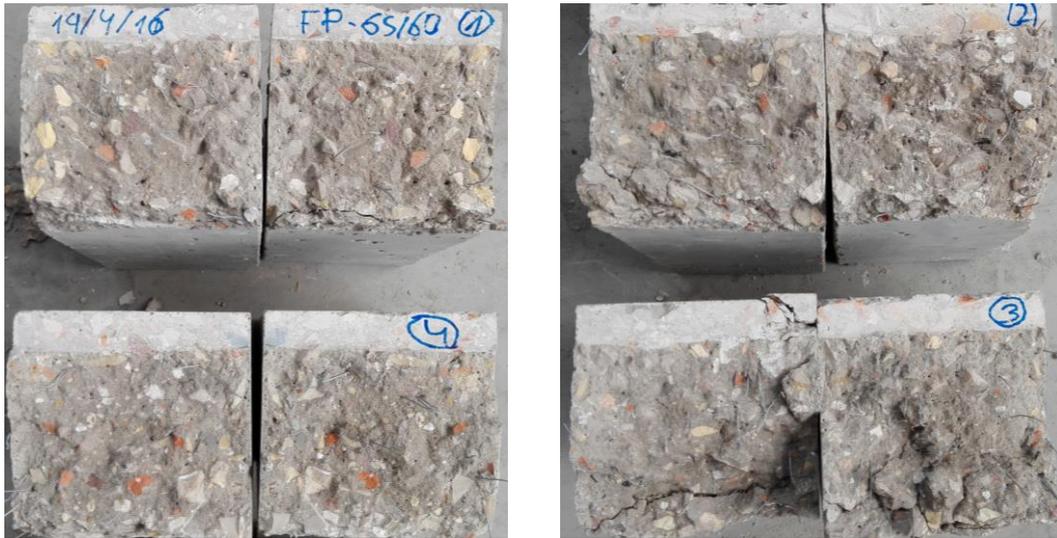


Figura 123. Sección de probetas de hormigón con AR-FM-65/60

7.5. Gráficas obtenidas en el ensayo de paneles redondos según ASTM C 1550-08

7.5.1. Round Panel FP- 5 kg

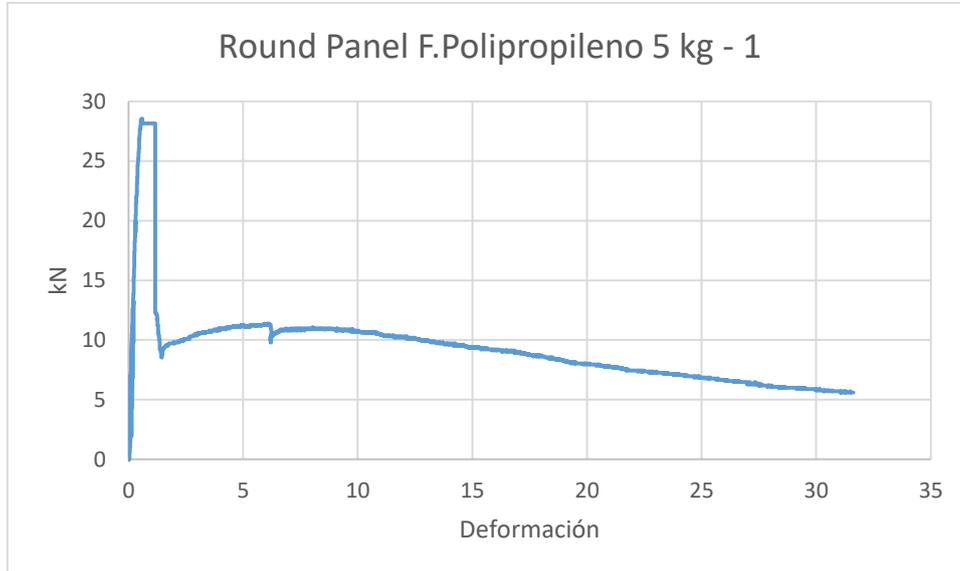


Figura 124. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FP 5kg-1

Tabla 39. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FP 5kg-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,81	7,72	7,73	
7,78	7,75	7,65	7,71
7,72	7,6	7,66	

W'	294,82
t (mm)	77,13
to (mm)	80
d (mm)	800
d0 (mm)	800
β	1,50625
δ (mm)	40
W	311,50

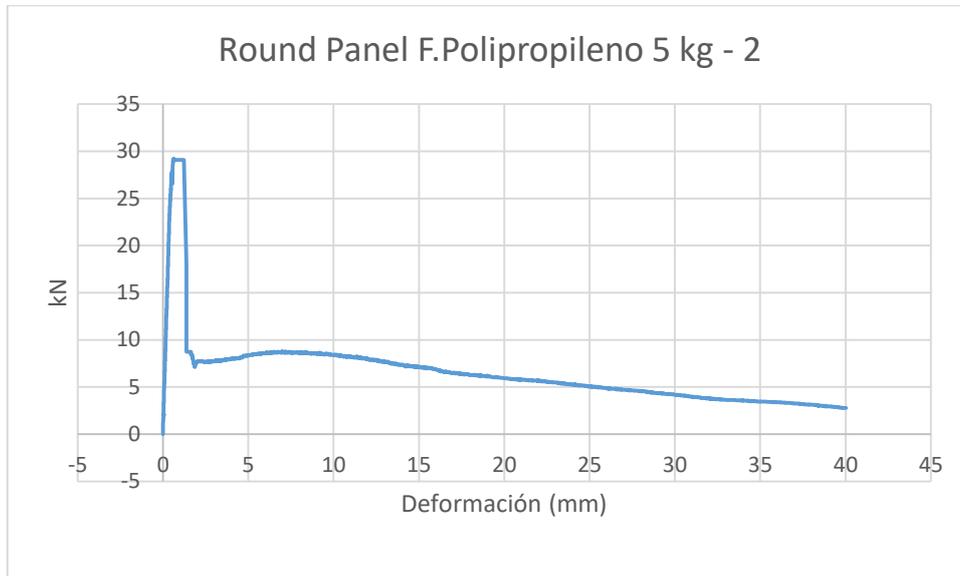


Figura 125. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FP 5kg-2

Tabla 40. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FP 5kg-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,9	8,2	8,47	
7,95	8,15	8,25	8,27
8,1	8,24	8,23	

W'	260,57
t (mm)	81,76
to (mm)	80
d (mm)	800
d0 (mm)	800
β	1,51
δ (mm)	40
W	252,16

7.5.2. Round panel con FP-10kg

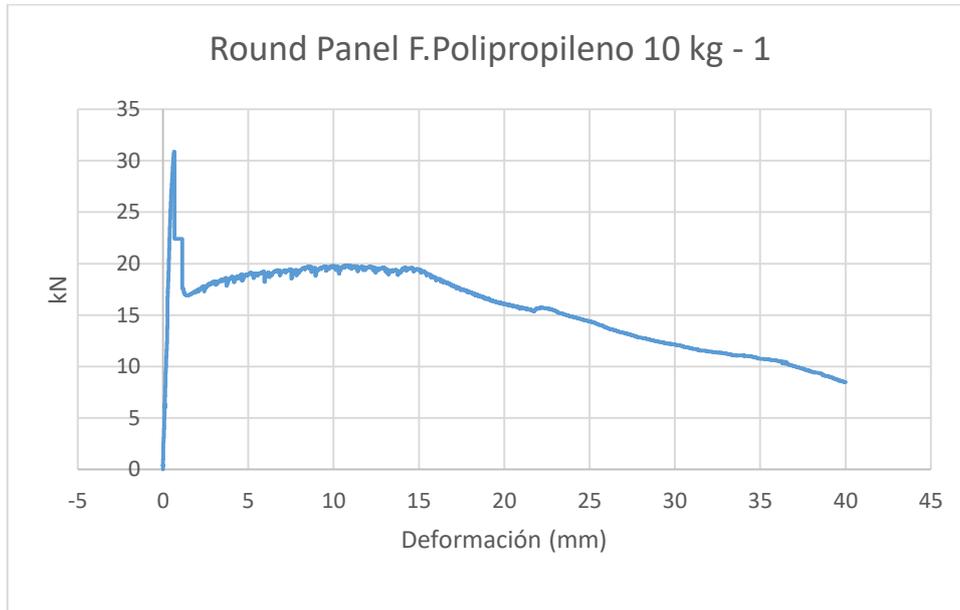


Figura 126. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FP 10kg-1

Tabla 41. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FP 10kg-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,9	8,2	8,47	
7,95	8,15	8,25	8,27
8,1	8,24	8,23	

W'	622,30
t	78,5
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	640,30

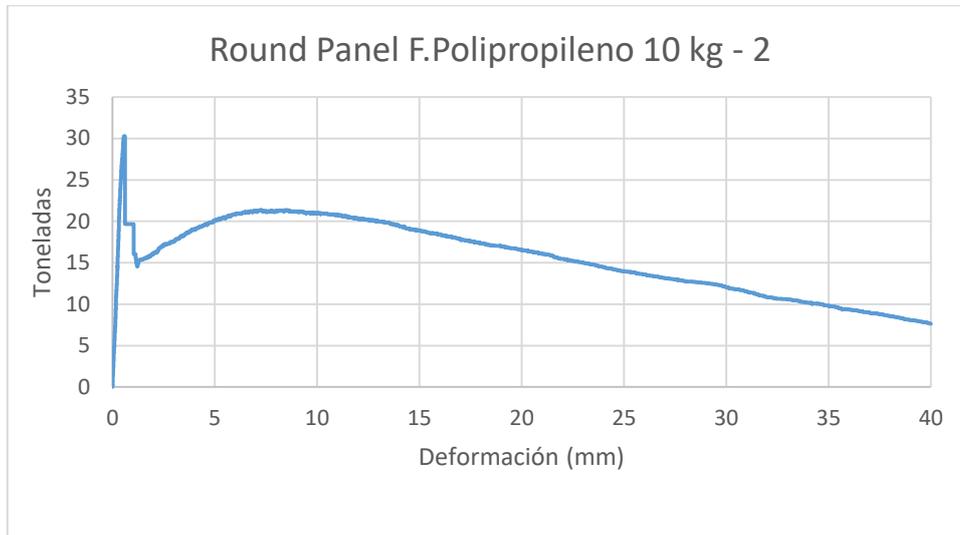


Figura 127. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FP 10kg-2

Tabla 42. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FP 10kg-2

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,73	8,01	7,99	
7,82	8,04	8,03	7,99
7,86	8,02	8,10	

W'	622,18
t	79,59
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	627,02

7.5.3. Round panel con FM-45/50

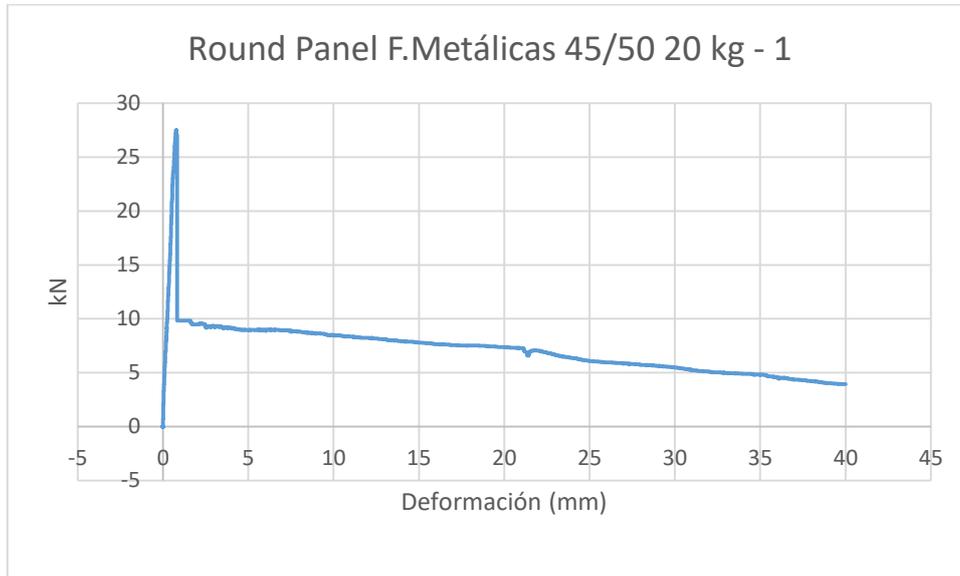


Figura 128. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FM 45/50-1

Tabla 43. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FM 45/50-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,66	7,57	7,99	
7,77	7,8	7,7	7,63
7,65	7,68	7,68	

W'	284,72
t	77,13
to	80
d	800
d0	800
β	1,50
δ	40
W	300,83

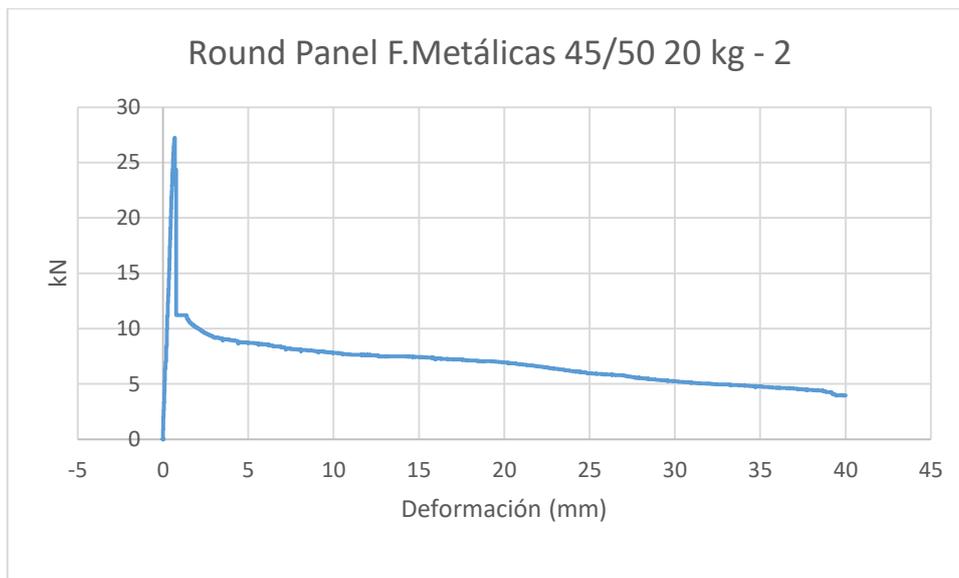


Figura 129. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FM 45/50-1

Tabla 44. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FM 45/50-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,8	7,6	7,7	
7,78	7,77	7,77	7,75
7,8	7,7	7,52	

W'	275,83
t	77,19
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	291,09

7.5.4. Round panel con FM-65/60

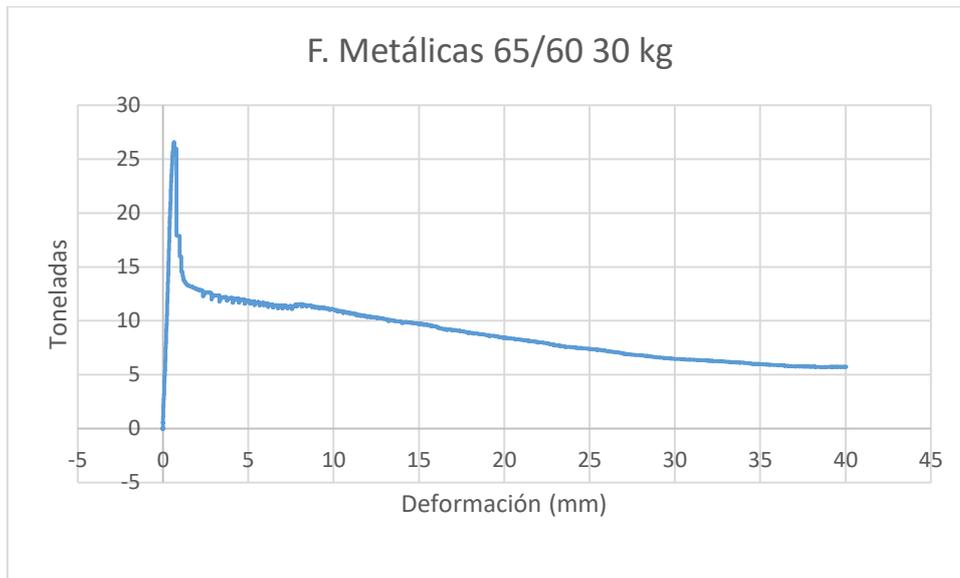


Figura 130. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FM 65/60-1

Tabla 45. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FM 45/50-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,75	7,8	7,56	
7,5	7,75	7,45	7,62
7,66	7,59	7,46	

W'	355,581769
t	76,14
to	80
d	800
d0	800
β	1,50625
δ	40
W	383,079921

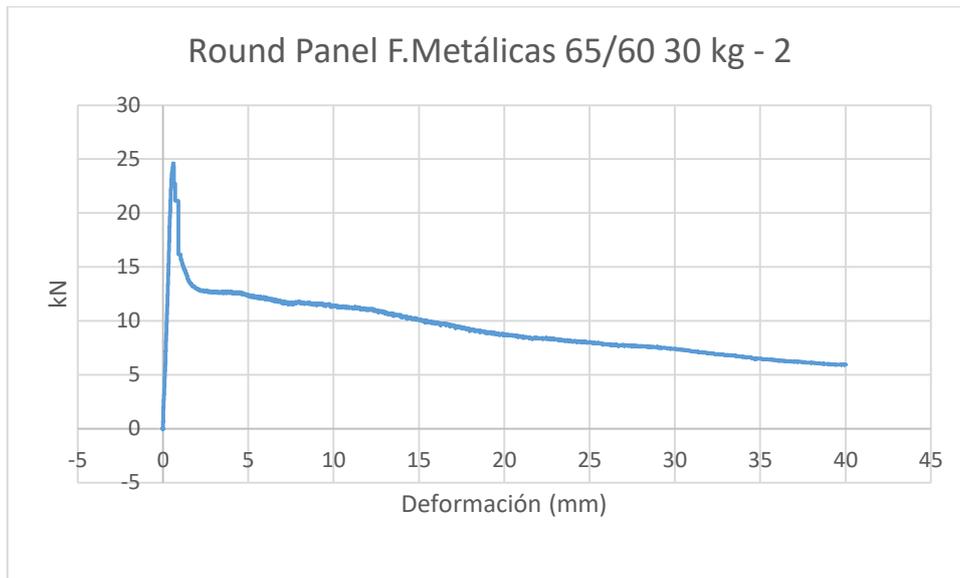


Figura 131. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con FM 65/60-2

Tabla 46. Espesor y energía absorbida del panel redondo con FM 45/50-2

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,9	8,2	8,47	
7,95	8,15	8,25	8,27
8,1	8,24	8,23	

W'	374,22
t	77,95
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	389,15

7.5.5. Round panel con AR-FP-5kg

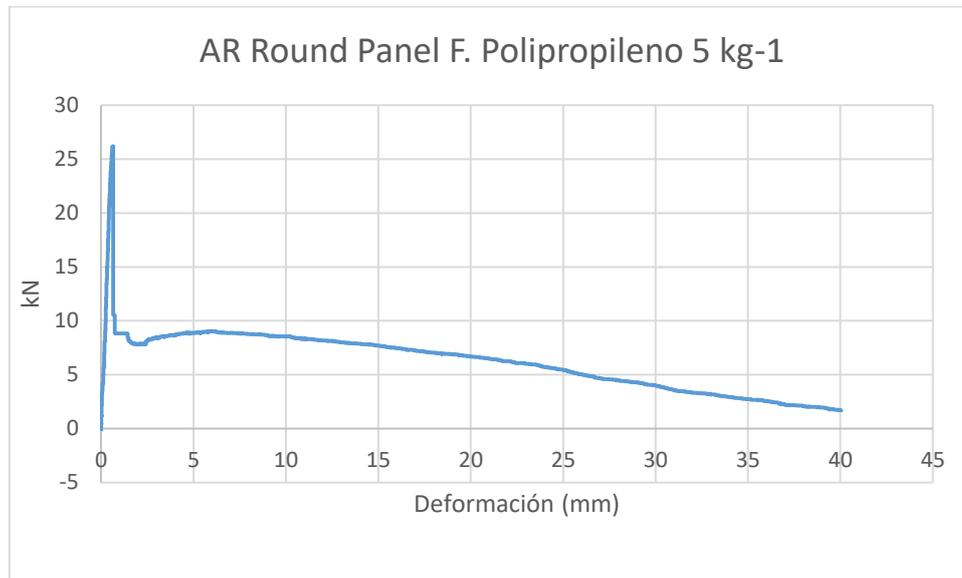


Figura 132. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con AR-FP 5kg-1

Tabla 47. Espesor y energía absorbida del panel redondo con AR-FP 5kg-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,6	7,48	7,32	
7,68	7,5	7,42	7,6
7,61	7,55	7,54	

W'	248,12
t	75,3
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	271,81

7.5.6. Round panel con AR-FP-10kg

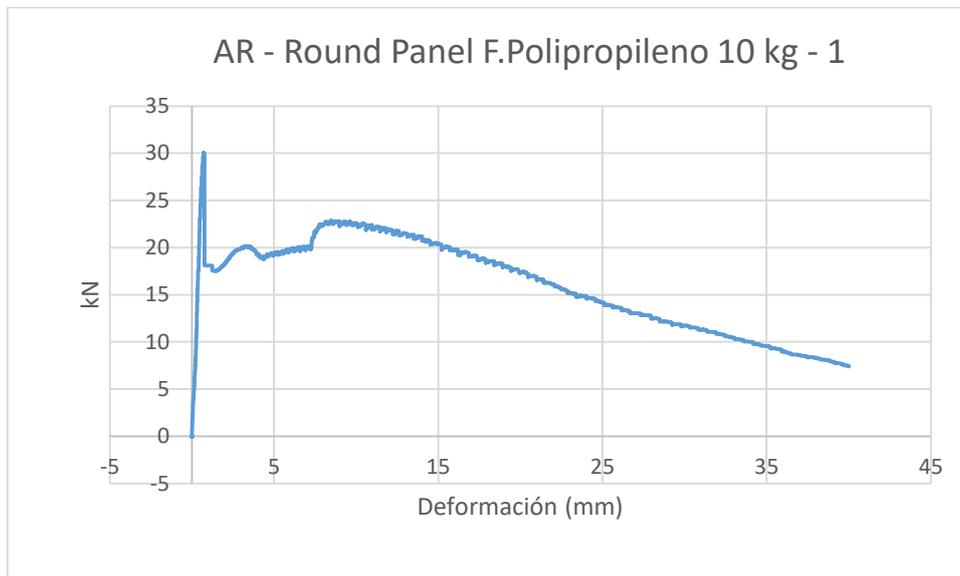


Figura 133. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con AR-FP 10kg-1

Tabla 48. Espesor y energía absorbida del panel redondo con AR-FP 10kg-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,95	7,92	8,15	
8,04	7,82	8,07	8
8,01	7,73	8,2	

W'	639,67
t	79,89
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	641

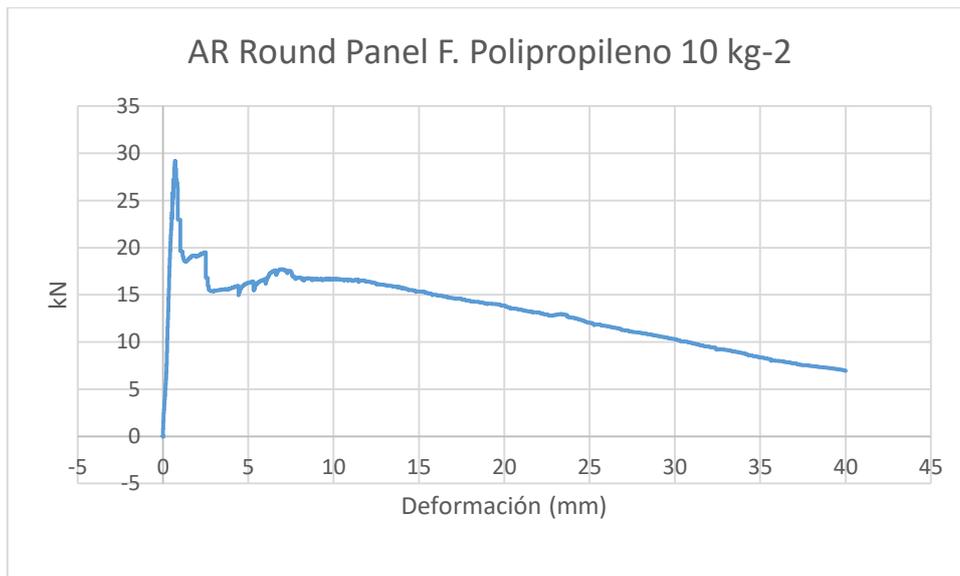


Figura 134. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con AR-FP 10kg-2

Tabla 49. Espesor y energía absorbida del panel redondo con AR-FP 10kg-2

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,62	7,82	7,7	
7,78	7,7	7,8	7,89
7,79	7,7	7,8	

W'	529,40
t	77,6
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	554,25

7.5.7. Round panel con FM-45/50

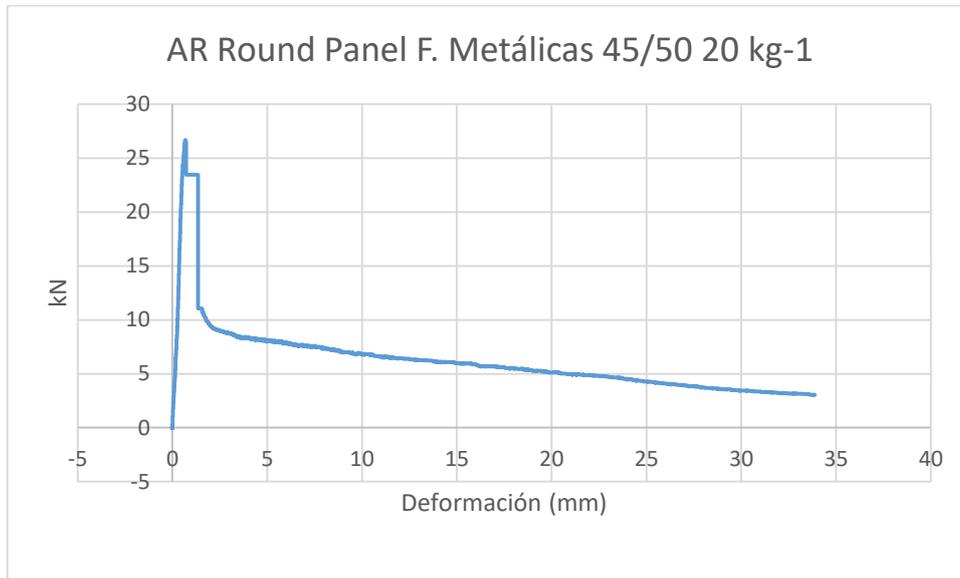


Figura 135. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con AR-FM 45/50-1

Tabla 50. Espesor y energía absorbida del panel redondo con AR-FM 45/50-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,8	7,95	7,95	
8,05	8,08	7,97	7,92
7,93	7,88	8,05	

W'	159,04
t	79,58
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	160,30

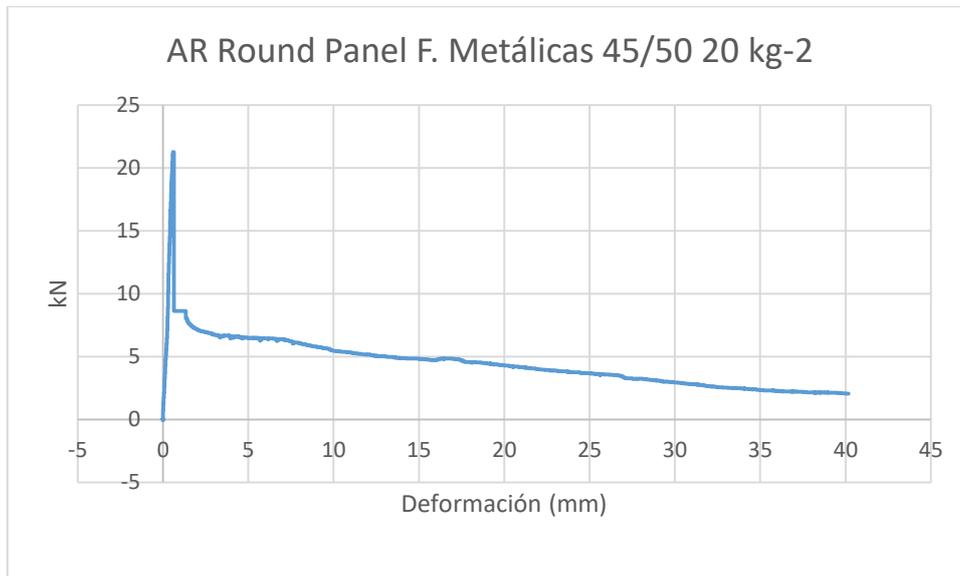


Figura 136. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con AR-FM 65/60-1

Tabla 51. Espesor y energía absorbida del panel redondo con AR-FM 65/60-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
8	8,18	8,05	
8,05	8,36	8,06	8,05
8,1	8,32	7,93	

W'	178,22
t	81,1
t₀	80
d	800
d₀	800
β	1,51
δ	40
W	174,59

7.5.8. Round panel con FM-65/60

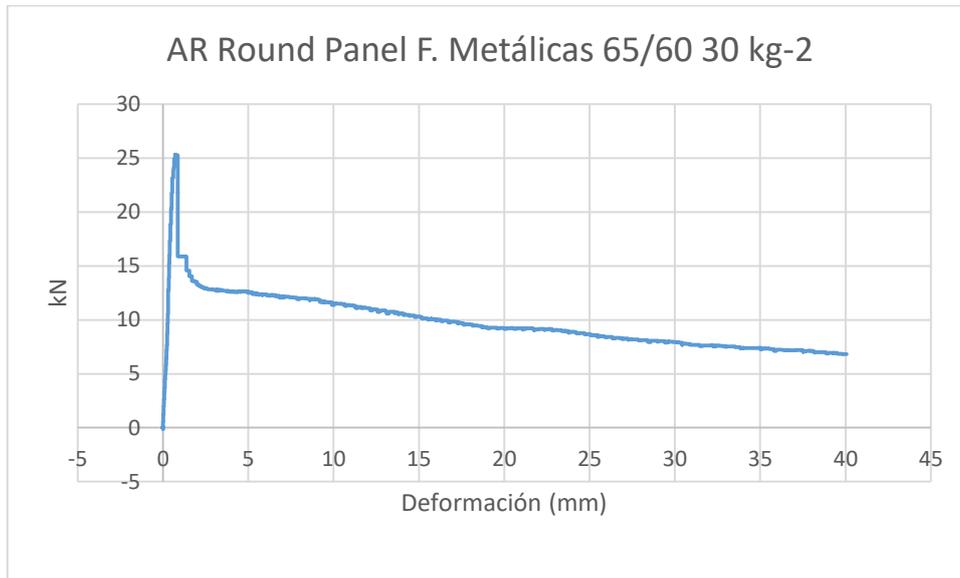


Figura 137. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con AR-FM 65/60-2

Tabla 52. Espesor y energía absorbida del panel redondo con AR-FM 65/60-2

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,75	7,8	7,56	
7,55	7,75	7,45	7,62
7,66	7,59	7,46	

W'	392,49
t	76,14
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	422,84

7.5.9. Round panel con HC

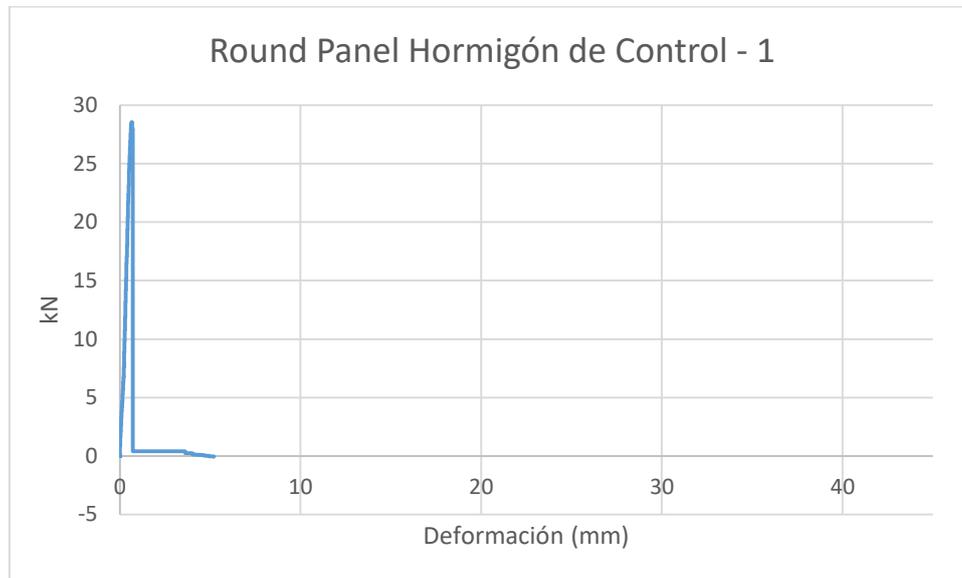


Figura 138. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con HC-1

Tabla 53. Espesor y energía absorbida del panel redondo con HC-1

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,8	8,15	8,42	
7,9	8,05	8,35	8,35
8	8,25	8,31	

W'	12,2
t	81,58
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	11,84



Figura 139. Gráfica carga/flecha del ensayo de panel redondo con HC-2

Tabla 54. Espesor y energía absorbida del panel redondo con HC-2

Espesor de lados (cm)			
Fisura 1	Fisura 2	Fisura 3	Centro
7,78	7,88	8,13	
7,89	8,14	8,15	8,12
7,88	8,01	8,02	

W'	11,40
t	80
to	80
d	800
d0	800
β	1,51
δ	40
W	11,4