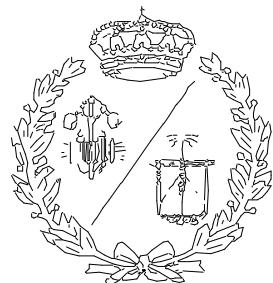


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Grado

**RECICLAJE DE POLIETILENO PARA LA
FABRICACIÓN DE FIBRAS PARA
HORMIGÓN ESTRUCTURAL:
PROPIEDADES MECÁNICAS**

**(Recycling polyethylene for producing fiber
for structural concrete: mechanical
properties)**

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Marcos Sánchez Matías

Septiembre - 2019

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen	1
Abstract.....	2
Motivación y objetivos	3
1. Estado del arte	4
1.1 Evolución de los plásticos	4
1.2 Problema de los plásticos en el medioambiente	7
1.2.1 Hormigón estructural	8
1.2.2 Propiedades físicas.....	8
1.3 Hormigones reforzados con fibras.....	10
1.3.1 Fibras poliméricas	11
1.3.2 Fibras polietileno tereftalato	13
1.3.3 Fibras polipropileno.....	14
1.3.4 Fibras policloruro de vinilo	14
1.3.5 Fibras de polietileno.....	15
1.4 Resumen.....	16
2. Materiales y metodología de ensayo.....	18
2.1 Proceso de reciclaje.....	18
2.2 Caracterización del polietileno	20
2.2.1 Densidad del polietileno	20
2.2.2 Ensayo de resistencia a tracción.....	22
2.2.3 Ensayo de dureza con el durómetro shore	27
2.3 Proceso fabricación de las fibras.....	28
2.4 Caracterización de las fibras de polietileno	29
2.4.1 Dimensiones.....	29
2.4.2 Rugosidad superficial	30
2.5 Hormigón estructural	31
2.5.1 Materiales	31

2.5.2 Procedimiento de amasado.....	32
2.5.3 Consistencia del hormigón fresco	34
2.5.4 Propiedades físicas del hormigón.....	36
2.5.5 Propiedades mecánicas del hormigón	43
3. Resultados y análisis.....	45
3.1 Caracterización de reciclados de polietileno	45
3.1.1 Densidad del polietileno	45
3.1.2 Propiedades mecánicas	46
3.1.3 Dureza.....	50
3.2 Caracterización de las fibras de polietileno	52
3.2.1 Propiedades geométricas	52
3.2.2 Rugosidad superficial	52
3.2.3 Resistencia a tracción	54
3.2.4 Comparativa entre polietileno original, probetas recicladas y fibras.....	57
3.3 Hormigón estructural	59
3.3.1 Consistencia del hormigón fresco.....	59
3.3.2 Propiedades físicas.....	60
3.3.3 Propiedades mecánicas	63
4. Conclusiones	68
5. Bibliografía	69

Índice de figuras

Fig. 1. Producción europea y global de los distintos tipos de polímero [5,6].....	5
Fig. 2. Producción y generación de residuos por tipo de polímero[5,8].....	6
Fig. 3. Producción y generación de residuos por sector[5,6].....	6
Fig. 4. Influencia de las fibras largas y cortas en la fisuración del hormigón [24].....	13
Fig. 5. Tuberías de polietileno.	18
Fig. 6. Granza de polietileno obtenida de la trituración de tuberías.	19
Fig. 7. Máquina de inyección (izq.) y molde utilizado (dcha.).	19
Fig. 8. Ciclo automático moldeo por inyección.....	20
Fig. 9. Determinación de la densidad del polietileno mediante el picnómetro Le Chatelier.	22
Fig. 10. Ensayo de tracción con la máquina de ensayos SERVOSIS.....	23
Fig. 11. Probeta normalizada de tracción tipo 5 [52].....	24
Fig. 12. Cuchilla con forma de probeta de halterio normalizada.	24
Fig. 13. Troquelado tuberías con la prensa (izq.) y obtención de probetas normalizadas (dcha.).	25
Fig. 14. Probeta normalizada de tracción tipo 1A [52].....	25
Fig. 15. Ensayo tracción probetas polietileno reciclado.	26
Fig. 16. Resultado probeta rota mediante ensayo de tracción.	26
Fig. 17. Ensayo tracción fibra de polietileno reciclada.....	27
Fig. 18. Durómetro Shore tipo D.....	28
Fig. 19. Prototipo de bobina de fibras (izq.) y bobina fabricada con material reutilizado (dcha.).	29
Fig. 20. Detalle fibra de polietileno reciclada.	30
Fig. 21. Mesa tridimensional (izq.) y detalle medición de la fibra (dcha.).	30
Fig. 22. Curvas granulométricas de los áridos.	32
Fig. 23. Materiales usados para la fabricación del hormigón con fibras.	33
Fig. 24. Incorporación de las fibras en el hormigón.	34
Fig. 25. Fabricación probetas normalizadas (izq.) y probetas desmoldadas y etiquetadas (dcha.).	34
Fig. 26. Medida de la altura del cono de Abrams.....	35
Fig. 27. Esquema de los cortes realizados a la probeta cilíndrica normalizada [57].....	36
Fig. 28. Esquema del dispositivo de vacío para el ensayo de densidad.....	39
Fig. 29. Medición del volumen aparente con balanza hidrostática.....	39
Fig. 30. Disposición del ensayo de permeabilidad al oxígeno.....	40
Fig. 31. Disposición ensayo permeabilidad al agua bajo presión.....	42
Fig. 32. Ejemplo de la huella de humedad dejada por el agua.....	42
Fig. 33. Ensayo de tracción indirecta.	44
Fig. 34. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de tracción del PT.....	46
Fig. 35 Ajuste con recta de regresión lineal del tramo elástico para obtener el E_t del PT.	47
Fig. 36. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de tracción del PR.....	49

Fig. 37. Ajuste con recta de regresión lineal del tramo elástico para obtener el E_t del PR.....	49
Fig. 38. Distribución normal de los diámetros de las fibras.....	52
Fig. 39. Perfil de alturas de una fibra de polietileno.....	53
Fig. 40. Detalle de la rugosidad de la fibra.....	54
Fig. 41. Curva tensión-deformación genérica de las fibras.....	55
Fig. 42. Comparativa del módulo elástico entre PT, PR y fibras.....	58
Fig. 43. Comparativa del límite elástico entre PT, PR y fibras.....	58
Fig. 44. Comparativa de la tensión de rotura entre PT, PR y fibras.....	59
Fig. 45. Comparativa de la deformación bajo carga máxima entre PT, PR y fibras.....	59
Fig. 46. Relación entre la absorción y el volumen de fibras del hormigón.....	61
Fig. 47. Relación entre la porosidad y el volumen de fibras del hormigón.....	62
Fig. 48. Resultado de la probeta sometida al ensayo tracción indirecta (izq.) y probeta partida por la mitad posteriormente para comprobar la adherencia de las fibras (dcha.).....	65
Fig. 49. Distribución de las fibras en la probeta cilíndrica.....	66
Fig. 50. Ejemplo de la dirección en las que se disponen las fibras.....	67

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de fibras y características [21].....	11
Tabla 2. Propiedades generales del PEBD [48]	16
Tabla 3. Dosificaciones del hormigón.	31
Tabla 4. Clasificación de hormigones en función de su permeabilidad al oxígeno [61].	41
Tabla 5. Medidas tomadas en el cálculo de la densidad del polietileno original.....	45
Tabla 6. Medidas tomadas en el cálculo de la densidad del polietileno reciclado.	45
Tabla 7. Parámetros de resistencia a tracción de las probetas PT.	47
Tabla 8. Parámetros de resistencia a tracción de las probetas de PR.....	50
Tabla 9. Valores de dureza Shore D del polietileno original.	51
Tabla 10. Valores de dureza Shore D del polietileno reciclado.	51
Tabla 11. Parámetros de rugosidad media de las fibras.....	53
Tabla 12. Resumen propiedades geométricas de las fibras.....	54
Tabla 13. Resultados ensayo tracción fibra.....	55
Tabla 14. Valores de asiento del cono de Abrams.	60
Tabla 15. Propiedades físicas del hormigón endurecido.....	60
Tabla 16. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno.....	62
Tabla 17. Permeabilidad al agua bajo presión.....	63
Tabla 18. Resistencia a compresión.	63
Tabla 19. Resistencia a tracción indirecta.	64

Resumen

La sociedad demanda elementos de construcción más sostenibles, por ello reciclar polímeros usados en la industria es un método de valorizar esos residuos y de reducir costes, además de prevenir la contaminación que genera su disposición en el medio ambiente. En búsqueda de tales objetivos en el presente trabajo se recoge una metodología de reciclaje de polietileno procedente de residuos de tuberías agrícolas para la fabricación de fibras y su posterior incorporación como refuerzo en el hormigón estructural. La fabricación de las fibras se realiza mediante la trituración de las tuberías y su posterior procesado con máquina inyectora. Previamente, a la introducción de las fibras en el hormigón se analizan sus propiedades a tracción y densidad comparándolas con el material original, con el fin de evaluar el proceso de reciclado y determinar si se producen pérdidas de prestaciones. Tras este análisis, se procede a determinar las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras para lo cual se propone la fabricación de tres tipos de muestras: hormigón de control, hormigón reforzado con 2 kg/m^3 de fibras y hormigón reforzado con 4 kg/m^3 de fibras. Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de las fibras mejora las propiedades mecánicas del hormigón, siendo el incremento más notable el de la resistencia a tracción indirecta, además de tener una excelente actuación controlando la fisuración del hormigón.

Abstract

Society demands more sustainable construction elements, and recycling polymers used in industry is a method to valorize these wastes and to reduce costs, as well as to prevent pollution generated by their disposal in the environment. Looking for such objectives, in the present paper a methodology to recycle polyethylene to manufacture fibers and its subsequent use as reinforcement for structural concrete is collected, as well as the results obtained from the characterization of both the fibers and the concrete. The fibers are manufactured using an injection machine, to subsequently analyze their mechanical and physical properties and to compare them with the original material, in order to evaluate the recycling process and determine if loss of performance appears. To determine the mechanical properties of concrete with fibers, the manufacture of three concrete samples is proposed: a control concrete, a reinforced concrete with 2 kg/m³ of fibers and a reinforced concrete with 4 kg/m³ of fibers. The results show that the incorporation of the fibers improves the mechanical properties of the concrete, particularly the tensile strength; and they also show an excellent performance controlling the cracking of the concrete.

Motivación y objetivos

El trabajo “Reciclaje de polietileno para la fabricación de fibras de hormigón estructural. Propiedades mecánicas” plantea como objetivo determinar si la aplicación de fibras recicladas en hormigones estructurales es viable y cuanto supone la mejora de sus prestaciones. Una de las consecuencias del uso de estas fibras será el control de la fisuración por retracción del hormigón. Por otro lado, también se mejorará el comportamiento del hormigón tanto a flexión como a tracción.

Los materiales poliméricos son usados en numerosas aplicaciones industriales debido a su capacidad para satisfacer grandes exigencias técnicas con un menor coste que otros materiales. El presente estudio se va a centrar en dichos polímeros, también llamados plásticos técnicos o ingenieriles, ya que actualmente representan uno de los sectores donde menos polímeros se reciclan debido principalmente a la poca o nula rentabilidad del mismo proceso.

El proyecto constará de varias etapas, inicialmente se realizará una revisión bibliográfica para determinar cuáles son los polímeros que más residuos producen y estudiar el uso materiales poliméricos reciclados en la fabricación de hormigones. El siguiente paso será la adecuación de tubos usados en la industria y la construcción facilitados por la planta de residuos Valoría, para su posterior reciclaje. El reciclaje se llevará a cabo mediante una máquina inyectora, con la que se obtendrán fibras poliméricas recicladas. Las fibras fabricadas serán sometidas a varios ensayos para verificar sus prestaciones mecánicas. A continuación, se procederá a fabricar hormigones con dichas fibras, y serán sometidos a una batería de ensayos de caracterización.

Mediante las técnicas propuestas se contribuye a la reutilización y sostenibilidad de los materiales los materiales poliméricos disminuyendo en parte el gran impacto medioambiental que producen hoy en día.

1. Estado del arte

Plástico es una palabra que deriva del griego *plastikos*, que significa moldeable. Hace referencia a la propiedad maleable de dicho material que le permite adoptar diversas formas. Cabe destacar que normalmente se hace un uso incorrecto de la palabra plástico para referirse a los materiales polímeros de manera cotidiana, pero es un término tan extendido que en la elaboración del presente trabajo se utilizan ambas palabras de manera indistinta. El plástico está compuesto por largas cadenas de moléculas de gran tamaño denominadas polímeros, se forman gracias al proceso químico de polimerización y se obtiene de derivados del petróleo y del gas natural. Principalmente se pueden clasificar en dos categorías, termoplásticos y termoestables. Los primeros incluyen plásticos (polietilenos de alta densidad (HDPE), polietilenos de baja densidad (LDPE), poliestirenos (PS), polipropilenos (PP), polietilenos tereftalatos (PET) o policloruros de polivinilo (PVC)) que no sufren cambios en su estructura química durante su calentamiento y se pueden fundir cuantas veces se desee para obtener formas nuevas. Los segundos (resina epoxi, siliconas, poliuretanos, etc.) sí sufren un cambio químico al calentarse por lo que una vez transformados no permiten que se modifique su forma [1].

1.1 Evolución de los plásticos

Desde el siglo XX ha proliferado el uso de plásticos en gran diversidad de productos, propiciado por sus las buenas propiedades tales como baja densidad, alta relación fuerza-peso, alta durabilidad, facilidad de diseño y fabricación, así como bajo coste [2]. La producción anual de los plásticos manufacturados, como se muestra en Fig. 1, se ha visto incrementada desde 2 Mt en 1950 hasta las 380 Mt 2015, llegando a la conclusión de que la producción total asciende a 8300 millones toneladas, de los cuales solo un 9% han sido reciclados. En términos de polímeros termoplásticos, los más producidos históricamente serían el PP en un 21%, el LDPE en un 20%, el HDPE en un 16%, el PVC en un 12% y el PET en un 10% [3].

La producción global de plástico en la actualidad asciende a 348 Mt, de los cuales Europa fabrica 64,4 Mt (18,5% del total). Para producir plásticos vírgenes se requiere el 4% de la producción mundial de petróleo, lo que sería el equivalente a 1,3 mil millones de barriles por año [4].

El sector europeo que más plástico demanda es el envasado con un 40%, seguido del sector edificación y construcción con un 20%. En cuanto a la generación de residuos el sector que más produce vuelve a ser el envasado, debido a la gran cantidad de productos de un solo uso que genera. Por otro lado, el sector de la construcción es el que menos residuos genera debido a que los plásticos usados tienen un tiempo de vida medio de 35 años, en la Fig. 2 se muestra esta comparativa entre polímero producido y el residuo que produce. Por otro lado podemos observar estos datos atendiendo al tipo de polímero, tal como indica la Fig. 3, donde los más demandados, excluyendo las fibras textiles, serían el PP con un 19,3%, el LDPE con un 17,5%, el HDPE con un 12,3%, el PVC con un 10,2% y el PET con un 7,4% entre otros [1].

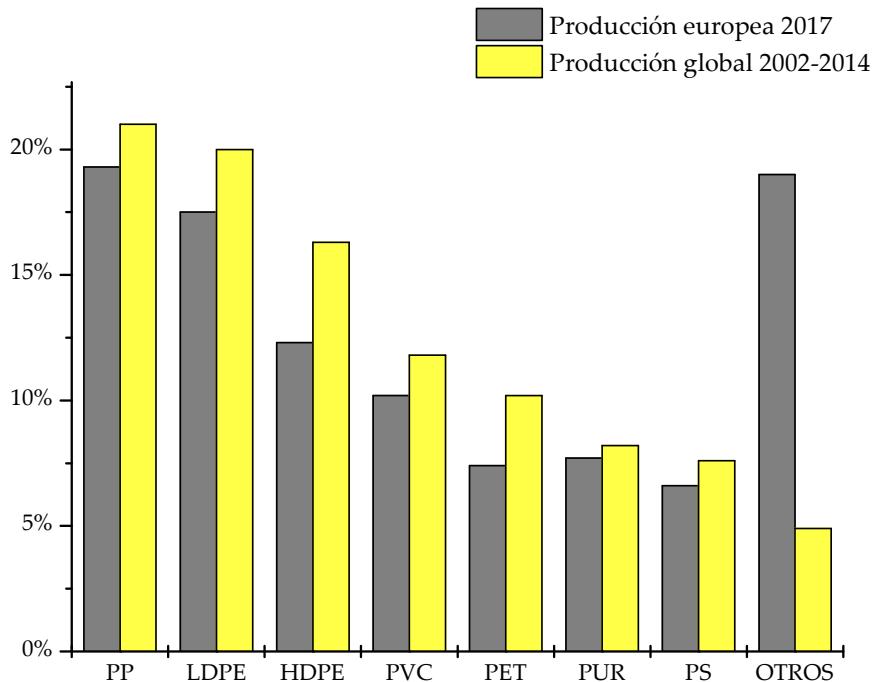


Fig. 1. Producción europea y global de los distintos tipos de polímero [5,6].

El ciclo de vida de los plásticos depende fundamentalmente del tipo de plástico y del tiempo de uso del producto, pudiendo ser menos de 1 año como en el caso del sector envases como hasta 50 años para el sector de la construcción. Por lo tanto, desde la producción del plástico hasta que se convierten en residuo, cada producto de plástico tiene un ciclo de vida diferente y el volumen de residuos recogidos no se puede comparar, en un solo año, con el volumen de producción o de consumo. Este es uno de los factores que explican porque la mayor tasa de residuos de plástico se centra en PE, PP y PET [1]. En 2017, la producción europea de plásticos fue de 64,4 Mt consiguiendo recogerse 27,1 Mt de residuos. Aproximadamente el 31% del residuo se recicló, el 42% fue recuperado para energía y el resto, un 27%, se depositó en vertederos. Por otra parte, España se encuentra por encima de la media europea en cuanto a reciclaje, siendo de un 36,5%. Sin embargo, sigue siendo inferior a la cantidad de residuo que deposita en vertederos, situada en un 46,4%.

El tradicional modelo lineal basado en: extraer, fabricar, usar y desechar para el consumo de plástico es insostenible. La mejor alternativa para la industria del plástico es la llamada economía circular, donde se hace mayor énfasis en reparar, reutilizar productos sacando así el máximo valor de ellos durante su vida útil. Cuando termina su vida útil se recuperan y reciclan [7].

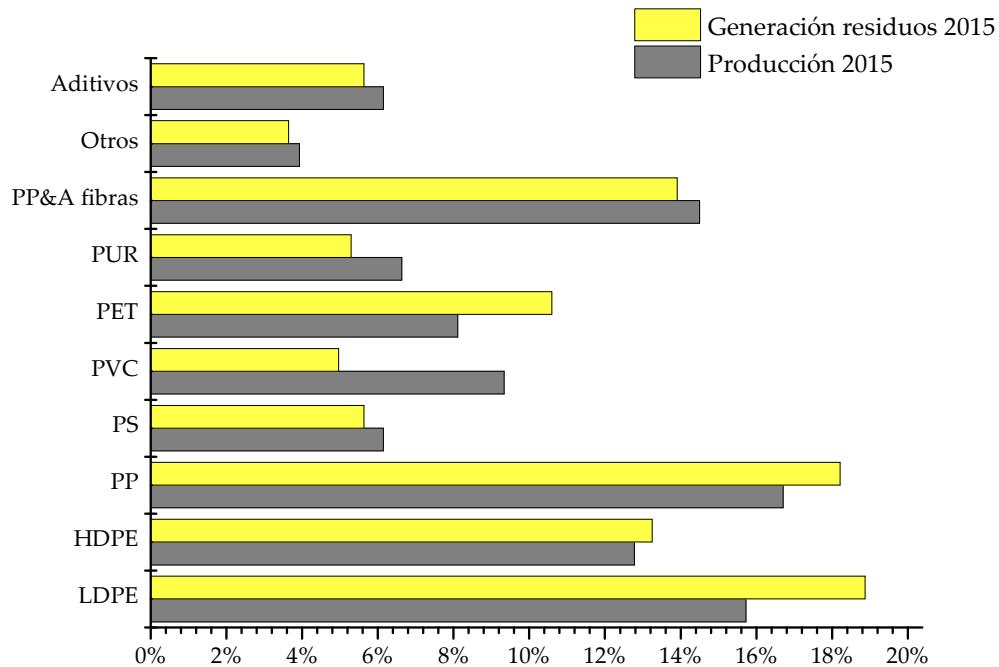


Fig. 2. Producción y generación de residuos por tipo de polímero[5,8].

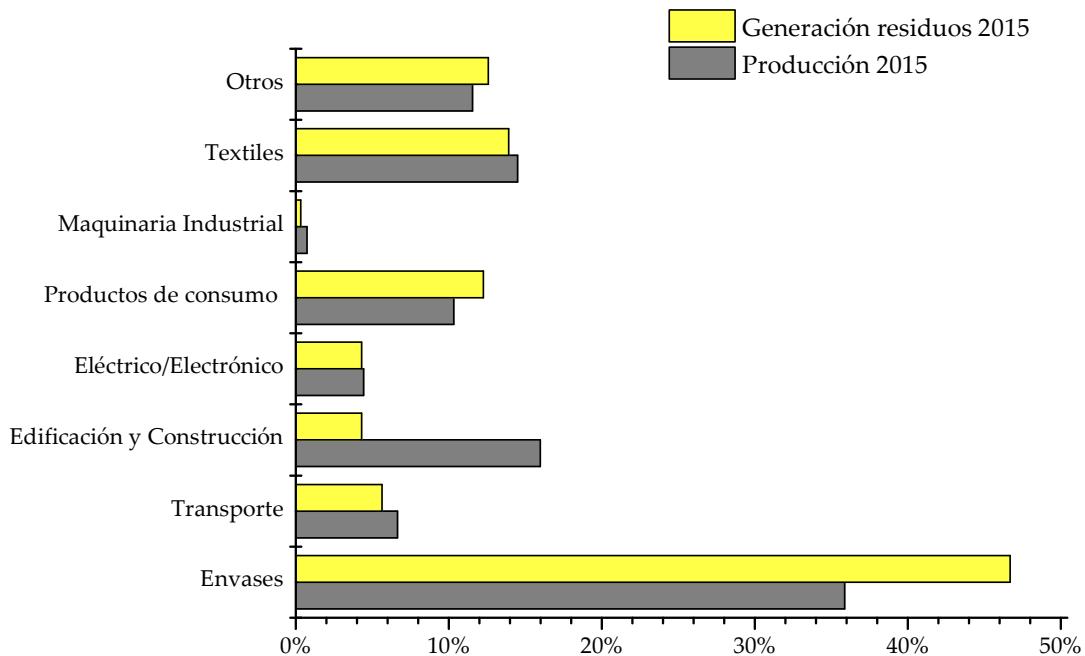


Fig. 3. Producción y generación de residuos por sector[5,6].

1.2 Problema de los plásticos en el medioambiente

Uno de los mayores problemas es el plástico que se tira o se deposita inadecuadamente ya que gran parte de este residuo descontrolado acaba en el mar. Los investigadores Eriksen et al. estimaron que hay prácticamente 270 kt de plástico en el océano [9]. Un caso notable de este problema lo encontramos en la “isla de basura” situada en el centro del océano pacífico norte. También se cuantificó las características de esta isla reportando que tiene el área de casi tres veces el tamaño de España [10].

Los polímeros necesitan cientos de años para degradarse en condiciones medioambientales normales. La degradación se puede definir como el cambio químico que reduce el peso molecular del plástico. Existen diferentes caminos para la misma tales como biodegradación, degradación térmica, foto-degradación, hidrólisis y degradación termo-oxidativa [11]. Para algunos autores un problema derivado de la descomposición y fragmentación de los plásticos es el origen de los llamados microplásticos [12]. Por otro lado, concluyeron que la ingesta de este residuo por parte de biota marina tiene efectos adversos en su salud y advirtieron del peligro de estos si pudieran pasar a la cadena alimenticia.

En este sentido, un artículo publicado en 2005 resaltaba la importancia de clasificar los residuos plásticos como peligrosos e instaba a tomar medidas sobre los cuatro plásticos que se consideraban más problemáticos: PVC, PS, PU, PC. Su argumentación se basaba en un análisis donde encontraron que al menos un 78% de las sustancias contaminantes listadas por la EPA y un 61% de sustancias listadas por la UE estaban asociadas con los residuos de plásticos [13].

El incremento de la producción de plástico acompañado de una baja tasa de reciclado ha llevado a unos serios incrementos en contaminación, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero, metano en vertederos, emisiones de químicos tóxicos (como el bisfenol A y el poliestireno) [14].

La opción más usada hasta ahora para combatir el residuo plástico son los vertederos, sin embargo, deberían ser considerados el último recurso porque requiere de una gran cantidad de espacio y causa problemas de contaminación a largo plazo [2]. La incineración es otra opción usada para aprovechar el alto poder calorífico de los polímeros en la que además el residuo es completamente eliminado. El principal problema que conlleva este método es la liberación de una gran cantidad de dióxido de carbono y de químicos venenosos. Por lo tanto, el reciclaje es la mejor solución para reducir el impacto medioambiental.

Según Ignatyev et al. [15] existen diferentes vías de reciclado:

El reciclaje mecánico primario es la reutilización directa de un polímero desecharo no contaminado en un nuevo producto sin pérdida de propiedades. En la mayoría de los casos, este reciclaje lo realiza el propio fabricante con los residuos postindustriales.

El reciclaje mecánico secundario es el procedimiento en el cual materiales como residuos plásticos de baja calidad, que no son adecuados para ser procesados directamente, son

reprocesados con el fin de obtener productos terminados o materiales con características de desempeño menores a los del material original.

El reciclado terciario abarca tanto el químico como el térmico. El reciclaje químico consiste en la descomposición química de plásticos residuales homogéneos, en sus componentes básicos o monómeros, utilizando agentes químicos como catalizadores para completar la despolimerización de los materiales que pueden de nuevo ser polimerizados. Por otro lado, el reciclaje térmico consiste en la descomposición a alta temperatura de los residuos plásticos, donde los componentes orgánicos son convertidos hasta romper los enlaces de la cadena polimérica.

Hamad et al. concluyeron que el reciclaje mecánico era el método más utilizado. Además, hallaron que la incorporación de una pequeña cantidad de polímero virgen con residuo del mismo tipo puede mejorar las propiedades del plástico reciclado obtenido [16].

1.2.1 Hormigón estructural

El hormigón es un material compuesto fabricado principalmente por tres elementos constituyentes ampliamente disponibles: cemento, áridos y agua, los cuales producen un excelente material en su estado endurecido. Además, el estado fresco en el que se produce el hormigón lo confieren de una magnífica versatilidad y adaptabilidad a las altas exigencias en el diseño estructural que se requieren actualmente. Estas propiedades también suponen ventajas económicas que hacen que el hormigón sea el principal material de construcción hoy en día. Es decir, por una parte, tenemos un material que puede ser diseñado específicamente para un proyecto con las propiedades deseadas y para el cual podemos usar materiales locales. Por otra parte, el material obtenido es uniforme, duradero y de alta calidad. Por ello, existe un gran interés en el desarrollo del hormigón ya sea con el objetivo de mejorar sus propiedades o de combinarlos con otros materiales de construcción. Este sería el caso, por ejemplo, del hormigón de alta resistencia (HAR), del hormigón autocompactante (HAC) o del hormigón reforzado con fibras (HRF) [17].

1.2.2 Propiedades físicas

1.2.2.1 Densidad

La densidad del hormigón endurecido depende de muchos factores, principalmente de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. La densidad será mayor cuanto mayor sea la densidad de los áridos utilizados y mayor cantidad de árido grueso contenga. Por otro lado, también aumentará cuanto mejor compactado este el hormigón.

Para un hormigón en masa normal la densidad estaría en torno a 2300 kg/m³ [18].

1.2.2.2 Porosidad

La porosidad es un parámetro íntimamente ligado a la densidad, depende de los mismos factores que ésta, sobre todo de la técnica de consolidación empleado. Estas técnicas tienen

como propósito meter, en un volumen determinado, la mayor cantidad posible de áridos y, al mismo tiempo, que los huecos dejados por éstos se rellenen con la pasta de cemento, eliminando por completo las burbujas de aire.

La porosidad tiene una relación directa con la resistencia mecánica del hormigón. Cuando disminuye la porosidad aumenta el volumen de material sólido que compone el hormigón, en relación con los volúmenes ocupados por el agua y el aire.

Una baja porosidad no solo proporciona un aumento de la resistencia mecánica, sino también otorga una mayor resistencia física y química frente a las acciones agresivas externas, ya que, al contener una cantidad mínima de huecos, las vías de penetración de los agentes exterior también son mínimas [18].

1.2.2.3 Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad constituye un ensayo no destructivo que pretende caracterizar la durabilidad potencial de un hormigón dado, midiendo la resistencia que ofrece a la penetración de medios agresivos, tales como cloruros, o la exposición a la carbonatación, ataques químicos o situaciones de hielo-deshielo [19].

Las dos formas en que el agua puede penetrar en el hormigón son por presión y por capilaridad. El factor más influyente en la permeabilidad es la relación agua/cemento, cuanto mayor sea dicha relación mayor será la permeabilidad. Existen diversos métodos para medir esta propiedad, unos están dedicados a la permeabilidad al agua bajo presión y otros a la permeabilidad al oxígeno. Para incrementar la impermeabilidad de un hormigón es imprescindible una correcta dosificación y compactación [18].

1.2.2.4 Propiedades mecánicas

1.1.1.1 Resistencia a compresión uniaxial

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón estructural. Su comportamiento depende de diversos factores que serán explicadas a continuación.

El cemento es un componente de la mezcla del hormigón que juega un papel importante en la resistencia a compresión. Un aumento en la dosificación del cemento repercutirá en una mayor resistencia a compresión. Además, también influirá la clase resistente del propio cemento y el valor de resistencia.

Un parámetro fundamental para las prestaciones mecánicas del hormigón sería la relación agua/cemento, siendo ésta inversamente proporcional a la resistencia. La relación agua/cemento puede disminuirse reduciendo la cantidad de agua o aumentando la cantidad de cemento. Es importante destacar que una relación agua/cemento alto conduce a una mejor trabajabilidad del hormigón, por lo que hay que buscar un equilibrio entre ambas propiedades.

En cuanto a los áridos utilizados para la fabricación del hormigón, han de poseer una distribución granulométrica lo más homogénea posible para lograr una densidad óptima en su estado final, característica íntimamente ligada con la resistencia del hormigón.

También hay factores externos que afectan a la capacidad resistente del hormigón tales como el curado, la edad y la temperatura de curado. Para un curado óptimo el hormigón debe ser hidratado de forma continua. En cuanto a la temperatura puede ser alta promoviendo un curado más rápido que no afecta a la resistencia final. Por último, la edad del hormigón le confiere de una mayor resistencia [19].

1.1.1.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, también llamado módulo de Young, del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo. Esta característica depende de los módulos elásticos de los áridos y del cemento, así como de las dosificaciones usadas. Para cargas pequeñas el módulo elástico del hormigón permanece prácticamente constante, sin embargo, cuando se alcanzan esfuerzos alto el módulo tiende a decrecer.

El módulo elástico del cemento típico ronda los 10-30 GPa, mientras que el módulo de un agregado habitual se sitúa en torno a los 45-85 GPa. El módulo promedio de un hormigón típico se sitúa en los 30-50 GPa [19].

1.1.1.3 Resistencia a tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta es una alternativa más sencilla y práctica para obtener la resistencia a tracción axial del hormigón. Este método consiste en la rotura de una probeta cilíndrica, mediante la aplicación de una carga de compresión en dos generatrices diametralmente opuestas [18].

El valor de la resistencia a tracción viene determinado principalmente por la adherencia entre los áridos y la pasta de cemento en la zona de transición, que a su vez depende del tamaño máximo del árido, de su limpieza superficial, de la geometría de este y del tipo de cemento. Uno de los objetivos para realizar este ensayo es determinar el comportamiento del hormigón frente a la fisuración [19].

1.3 Hormigones reforzados con fibras

El uso de fibras como refuerzo de hormigones no es un método nuevo, ya desde el siglo XVI se usaba fibras de paja o pelo de caballo. Posteriormente, hacia el año 1900, se popularizó el uso de fibrocemento. Hasta que se descubrió los efectos perjudiciales para la salud que provocaban las fibras de amianto que contenía. Por ello, desde los años 60 ha aumentado rápidamente el desarrollo de fibras alternativas en el sector de la construcción. Los principales materiales usados para fabricar fibras son: aceros, vidrios, polímeros y componentes naturales. En la Tabla 1 se muestran algunas de las fibras más comunes (American Concrete Institute (ACI), 2009).

Tabla 1. Tipos de fibras y características [21].

Fibra	Diámetro (μm)	Densidad (10^3 kg/m^3)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia a tracción (GPa)	Elongación de rotura (%)
Acero	5-500	7,84	200	0,5-2	0,5-3,5
Vidrio	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,04	3	180	3,3	2-3
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Aramida	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Carbono	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4	0,5-1,5
Nylon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1	16-20
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
Celulosa	15-20	1-1,2	8-10	0,5-1	15
Fibra de madera	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1,5	8-10	0,3-0,8	3
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1	3

La inclusión de fibras en el hormigón es un método que se sigue utilizando hoy en día para mejorar propiedades del hormigón, como la durabilidad, módulo elástico, control de retracción, resistencia a fuego, resistencia a flexión, etc. [22].

Las propiedades del hormigón reforzado con fibras están controladas por una serie de factores, los más determinantes son los siguientes [23].

- Magnitudes del módulo elástico tanto de la fibra como de la matriz.
- La relación entre el módulo de elasticidad de la fibra y el de la matriz.
- Tipo y propiedades de la matriz (dúctil o frágil).
- Tipo, contenido, geometría, forma y orientación de la fibra.
- Adherencia entre las fibras y la matriz.

1.3.1 Fibras poliméricas

Una fibra polimérica es un polímero cuyas cadenas están extendidas en línea recta (o casi recta) una al lado de la otra a lo largo de un mismo eje.

Es bien sabido que las fibras plásticas son menos susceptibles a los efectos de la corrosión, reacciones alcalinas, agua ácida, sal, cloro, productos químicos y microorganismos que las fibras de acero [26]. Por lo tanto, el uso de fibras poliméricas como refuerzo en hormigones para ser utilizados en ambientes corrosivos no solo proporciona altas propiedades mecánicas y durabilidad, sino que también puede reducir el peso estructural y el costo de construcción. [27]

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico extrusionado y posteriormente cortado y están regidas según la norma UNE-EN 14889-2:2008. *"Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad"*[22].

Aludiendo a la norma UNE-EN 14889-2, las fibras poliméricas pueden ser clasificadas en dos grupos atendiendo al método de fabricación:

- Tipo I: Monofilamentos extruidos
- Tipo II: Láminas fibriladas

Por otro lado, dependiendo de su diámetro se dividen en otras dos categorías:

- Microfibras ($<0,30$ mm diámetro)
- Macrofibras ($\geq0,30$ mm diámetro).

Las microfibras se consideran como no estructurales y su principal función es la de controlar y reducir la fisuración por retracción plástica, también se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego y en menor medida pueden mejorar la tenacidad.

Las macrofibras aparte de reducir la fisuración también pueden considerarse estructurales y son usados para mejorar la resistencia a flexión, resistencia al impacto y el comportamiento a fatiga. Su longitud está relacionada con el tamaño máximo del árido, siendo esta de 3:1. Las macrofibras pueden tener diversas geometrías que afectaran al comportamiento del hormigón frente a los esfuerzos, como puede verse en la

Fig. 4. Las fibras cortas unen las microfisuras de manera más eficiente por lo que tienen una influencia significativa en el aumento de la resistencia a flexión. Se usan en grandes cantidades y su grosor ha de ser pequeño porque una esbeltez alta afecta negativamente a la trabajabilidad del hormigón. Por otro lado, las fibras largas mantienen unidas las roturas de mayor tamaño, mejorando la ductilidad del hormigón y aportando resistencia residual tras la rotura del elemento, se han de usar en menor proporción debido a su baja trabajabilidad.

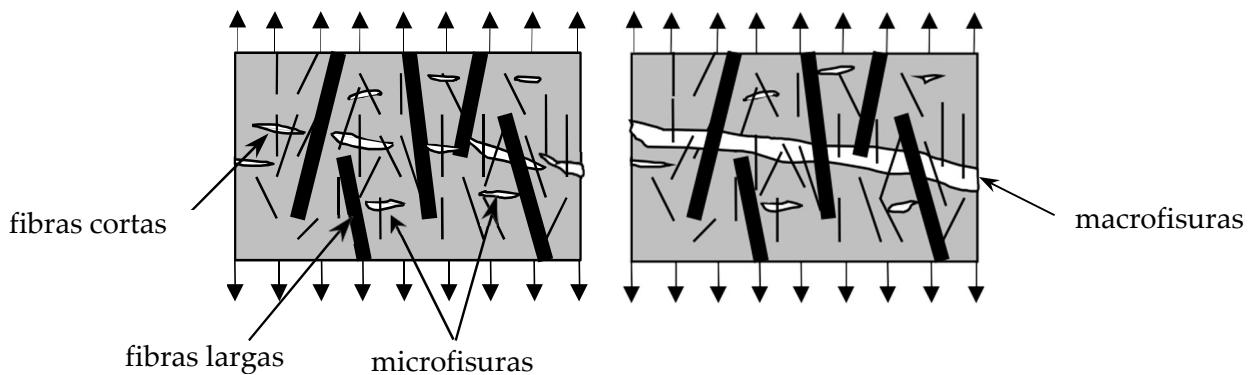


Fig. 4. Influencia de las fibras largas y cortas en la fisuración del hormigón [24].

1.3.2 Fibras polietileno tereftalato

Foti hizo un estudio preliminar sobre el uso de fibras de PET como refuerzo en hormigones, para ello cortó botellas de agua mineral y bebidas gaseosas en láminas de 35 mm de longitud y 5 mm de ancho. El resultado de los test indican una mejora en el comportamiento post-fisuración y un incremento de la ductilidad del hormigón [28].

Fraternali et al. determinaron que las fibras de diámetro 1,10 mm y 40 mm en 1% volumen obtuvieron el mejor rendimiento. La resistencia del hormigón a compresión aumentó un 35%, la resistencia a flexión aumentó un 41% y la ductilidad máxima aumentó un 656% [29]. En un trabajo posterior redujeron la ratio agua/cemento de 0,53 a 0,38 obteniendo resultados diferentes. La fibra de diámetro 0,7 mm y longitud 52 mm mejoró la resistencia a flexión un 8% y empeoró la resistencia a compresión un 8,3%. Reconocieron una tendencia general a la reducción de los efectos beneficiosos del PET con la disminución de la ratio agua/cemento [30].

Pelisser et al. obtuvieron que para fibras de 20 mm y con un porcentaje de fibras de 0,18% y 0,30% se incrementaba la resistencia a flexión y al impacto, siendo el tiempo de curado de 28 días. Sin embargo, a los 150 días, estas mejoras ya no estaban presentes debido a la degradación del PET en el entorno alcalino. Los valores de resistencia a compresión y módulo de Young se vieron influenciados por las fibras [31].

Borg et al. concluyeron que la adición de fibras PET reduce la resistencia a compresión entre un 0,5% a un 8,5%, siendo mayor al aumentar el volumen de fibras. En cuanto a las pruebas de flexión los hormigones con fibras lograron un incremento de la carga máxima y todos tuvieron un comportamiento elástico lineal similar hasta el fallo. También se estudió la formación de grietas por retracción plástica, donde la fisura más pequeña la obtuvo el hormigón con 1,5% de volumen de fibras de 50 mm de longitud [32].

Pereira et al. buscaron optimizar las propiedades de compresión y tracción del hormigón con fibras. Los resultados mostraron que el volumen de fibras afecta a la resistencia a compresión mientras que la longitud de la fibra no lo hace. Por otro lado, tanto el volumen de fibras tanto la longitud de éstas puede modificar la resistencia a flexión. Según el modelo matemático que

crearon los valores óptimos serían con una longitud de 22 mm y un volumen de fibras de 0,06% [33].

Bui et al. usaron elementos no vistos hasta ahora, hormigón reciclado y humo de sílice. Sus experimentos determinaron que las fibras PET no mostraron degradación por ambiente alcalino en 90 días. Por otro lado, la combinación de humo de sílice y fibras de PET aumentó la resistencia a compresión de 3,6 a 9%, el módulo elástico de 16,9 a 21,5%, la resistencia a tracción de 11,8 a 20,3% y la resistencia a cortadura de 7 a 15% [34].

Meza et al. dedujeron que la combinación de dosificaciones altas y relaciones de aspecto bajas mejoraban la trabajabilidad del hormigón. Mientras que la resistencia a flexión era mejor cuando tanto la dosificación como la relación de aspecto eran altos [35].

1.3.3 Fibras polipropileno

Shi estudió la degradación de las fibras en el hormigón, resultando que las fibras recicladas de polipropileno mostraban una buena resistencia al ambiente alcalino. También obtuvo que la adición de una baja dosificación de fibras (4 y 6 kg/m³) no afectaba en la resistencia a la compresión, mientras que mejoraban significativamente la resistencia a flexión [14].

Kwan et al observaron que la resistencia a flexión y la absorción de energía de impacto incrementaban un 24,7% y un 59,4% respectivamente [36].

Corinaldesi et al. ensayaron distintos contenidos de fibras en el hormigón, todos ellos mostraron un ligero incremento en la resistencia a compresión de entre un 6% y un 11%. Respecto a la resistencia a flexión la mezcla con 2% volumen de fibras obtuvo la mayor mejora pasando de 4,7 MPa a 18 MPa [37].

Rostami et al. comprobaron que las fibras de PP no se degradan por el ambiente alcalino de la matriz de concreto. La inclusión de las fibras indujo a una mayor resistencia a la fisuración y de la propagación del agrietamiento en el hormigón. Las fibras con un diámetro de 0,4 mm mejoraron la resistencia a compresión un 8,9%, la resistencia a tracción un 83% y la resistencia a flexión un 41% [38].

1.3.4 Fibras policloruro de vinilo

En 2016 Kurup et al. estudiaron como en comparación con el hormigón de control (sin refuerzo), la resistencia máxima a compresión del hormigón con 0,8% de fibras de PVC aumentó en aproximadamente un 30,8%. Para volúmenes por encima de 0,8% se observó una disminución en la resistencia a la compresión. Por otro lado, el hormigón con fibras no mostró el fallo por rotura frágil. También se comprobó que la resistencia a la flexión del hormigón con 0,8% volumen de fibras aumentó en un 9,11%. De manera similar, la adición de polvo de sílice en el hormigón reforzado con fibra PVC aumentó la resistencia a la flexión en aproximadamente un 16%. La resistencia a la tracción que contiene 0,8% fibra con y sin polvo de sílice aumenta hasta un 19,6% y 7,11%, respectivamente [39]. En investigaciones posteriores encontraron que la resistencia a la cortadura del hormigón disminuye con el aumento del contenido de fibras, sobre todo a partir de 0,6% volumen de fibras [40].

Arunima reportó que las mayores mejoras se daban para un volumen de fibras de un 0,2%. Obteniendo que la resistencia a compresión incrementaba un 21,67, la resistencia a flexión un 15,71% y la resistencia a tracción pasaba de 3,51 MPa a 3,93 MPa [41].

Gull et al. analizaron la resistencia del hormigón usando diferentes longitudes de fibras de PVC. Con un volumen de fibras 0,8% y una longitud de fibras de 4 y 3 cm, la resistencia a la compresión aumentó hasta el 5,98% y el 6,98%, respectivamente. El mayor incremento de la resistencia a compresión se dio con una longitud de 3 cm y un volumen de un 1%, aumentando un 10,6%. En cuanto a la resistencia a la flexión el mejor incremento fue de un 55,5% con una fibra de 3 cm. Por último, la mejor resistencia a tracción se dio con una longitud de fibras de 5 y 4 cm y un 1% de volumen siendo el incremento de 2,3% y 4,6%, respectivamente (Gull & subramanian, 2014).

1.3.5 Fibras de polietileno

Uno de los mayores residuos generados en el planeta son las bolsas de plástico. Por ello se desarrollan hormigones con agregados no convencionales. Un estudio utilizó como agregados residuos de LDPE, determinándose que para un volumen de 0,8% de polímero se aumentó la resistencia a compresión de 26,67 MPa 36,07 MPa y de la resistencia a tracción de 2,25 MPa a 2,64 MPa [43].

Otro estudio diseñó hormigones reforzados con fibras de LDPE tanto cortas, de entre 5-12 mm de longitud, como largas, entre 20-35 mm, en distintas proporciones. Lo primero que se observó es que la incorporación de 0,1%, 0,2%, 0,3% y 0,4% volumen fibras cortas disminuía en un 15%, 40% y 69% la trabajabilidad del hormigón respectivamente, siendo más acusado con el uso de fibras largas. Respecto a las características mecánicas se advirtió que la resistencia a la flexión aumentaba para todos los volúmenes, destacando que para 0,1% de volumen de fibras largas aumentó de 2,95 MPa a 3,30 MPa. La resistencia a tracción mejoró con un 0,3% volumen de fibras cortas de 3 MPa a 3,21 MPa. Por último, el mejor comportamiento a compresión se consiguió con un 0,1% de volumen de fibras largas pasando de 20,95 MPa a 24,02 MPa [44].

Por otro lado, también se han utilizado fibras de HDPE producidas a partir de botellas de plástico. Los resultados obtenidos indican una mejora de la resistencia a compresión de 37,4 MPa a 49,3 MPa, de la resistencia a flexión de 3,5 MPa a 9,89 MPa y de la resistencia a tracción de 2,9 MPa a 5,1 MPa para un volumen de fibras de 6% [45].

En 2016 se realizó un estudio con fibras de HDPE recicladas mediante extrusión, para el cual se usaron porcentajes de 0,4 a 1,75% de volumen de fibras. Los valores de resistencia a flexión se aumentaron un 30-40% mientras que la resistencia a compresión se veía disminuida ligeramente. En cuanto a la permeabilidad al agua se demostró como la inclusión de fibras reducía de un 17 a un 42% dicha permeabilidad. También se observó una reducción en las grietas por contracción plástica [46].

Un tipo de hormigón en constante desarrollo es el llamado hormigón de alto rendimiento, usado por ejemplo para la rehabilitación de estructuras. Se propuso el diseño de un hormigón

de dichas características utilizando un 2% de volumen de fibras de PE, los resultados fueron una reducción del 30,9% de la resistencia a compresión, la resistencia a tracción se mantuvo prácticamente constante y un incremento un 82% la resistencia a flexión [47].

Como datos de referencia, en la Tabla 2Tabla 1;Error! No se encuentra el origen de la referencia. se han recopilado las propiedades mecánicas, térmicas, físicas más comunes del polietileno de baja densidad.

Tabla 2. Propiedades generales del PEBD [48].

Propiedades	Norma (ISO)	Unidades	Valor típico
Resistencia tracción	527-2	MPa	6-19
Módulo de Young	527-2	GPa	0,1-0,3
Alargamiento rotura	527-2	%	93-820
Resistencia impacto-tracción	8256	kJ/m ²	1,8-12
Dureza Shore D	868	-	44-52
T ^a de fusión	11357-3	°C	103-113
T ^a transición vítreo	11357-2	°C	74-109
Calor específico	-	J/(kg·K)	1900-2300
Densidad	1183	g/cm ³	0,918-0,927
Índice de fluidez en masa	1133	g/10 min	130
Absorción agua saturada	62	%	<0,015

1.4 Resumen

Tras haber realizado una exposición de los diferentes estudios en lo que respecta al reciclaje de polímeros y su uso como refuerzo en hormigones se pueden sacar algunas conclusiones preliminares:

- El volumen de producción de polímeros se mantiene en constante crecimiento, siendo los polietilenos y los polipropilenos los que abarcan gran parte de esta. Los sectores que más demandan estos polímeros se corresponden con el envasado, con la construcción y la edificación.
- En cuanto a la gestión de residuos se puede observar que el reciclaje aumenta paulatinamente, pero la ratio de residuo que es descartado es todavía mayor. Sin embargo, cabe destacar que a nivel europeo el reciclaje y la recuperación de energía está por encima de la media global.
- Uno de los mayores inconvenientes de no tratar adecuadamente los residuos plásticos es que la gran parte acaba en el mar, donde tarda cientos de años en degradarse, provocando importantes problemas medioambientales.

- Con respecto al hormigón reforzado con fibras se puede concluir que es una buena alternativa para reducir algunos de los inconvenientes que presentan el hormigón convencional. La inclusión de las fibras crea un material más homogéneo cuya resistencia a tracción y a fatiga es mayor que la del hormigón tradicional, además de ser muy efectivas controlando la fisuración.
- El uso de fibras poliméricas en la mayoría de los casos produce una disminución en la resistencia a compresión del hormigón, sin embargo, la resistencia a flexión tiende a aumentar. Otra propiedad característica en estas fibras es su buena resistencia a ambientes alcalinos y su capacidad de no corroerse. Además, hay que tener en cuenta que es una alternativa económica y sencilla de poner en obra.
- Las fibras más usadas actualmente en la construcción son fabricadas de polipropileno, sin embargo, hay un creciente interés en el uso de fibras de polietileno como refuerzo. Por otro lado, cabe destacar que hay pocos estudios que usen fibras de PE reciclado, por lo que nos encontramos ante una línea de investigación en la cual se necesitarán desarrollar más trabajos en un futuro.
- Un aporte metodológico de este trabajo es la descripción y realización de fibras de polietileno reciclado mediante el uso de una maquina inyectora.

2. Materiales y metodología de ensayo

2.1 Proceso de reciclaje

El proceso de reciclaje seguido en este proyecto consta de varias etapas: la obtención de material, la limpieza, la trituración, el secado y la inyección.

El polímero seleccionado para el trabajo es el polietileno, concretamente el polietileno de baja densidad que se usa en el sector industrial y de la construcción. En este sentido, la primera medida es el acopio del termoplástico. Para ello, se recopilan tuberías negras, con bandas azules, de 25 mm de diámetro, como se aprecia en la Fig. 5 procedentes de la planta de residuos Valoria.

La limpieza es un paso fundamental, ya que las impurezas de cualquier índole pueden ocasionar problemas en el cilindro y en la boquilla de la máquina de inyección, además de introducir heterogeneidades en el producto final empeorando sus prestaciones mecánicas.

Para ello, se cortan las tuberías en tramos más pequeños con una sierra eléctrica y se limpian manualmente con agua y con ayuda de una pistola de aire comprimido.



Fig. 5. Tuberías de polietileno.

La trituración de las piezas se realiza en un molino recuperador de material termoplástico, de la marca Matéu y Solé S.A. modelo 19/25 M5-5 insonorizado con cuchillas de acero endurecido y dotado de tamices que reducen el tamaño de los gránulos a 5-6 mm, tal como se ve en la Fig. 6.



Fig. 6. Granza de polietileno obtenida de la trituración de tuberías.

Antes de proceder a la inyección, el material se deja secar en el horno varias horas para evitar problemas como la cavitación en el cilindro de la máquina o burbujas de vapor que generen poros en el producto final. El polietileno al ser un polímero no higroscópico su capacidad de absorber humedad es baja, por lo que con un secado de 2 horas a 60°C resulta suficiente.

En la etapa de inyección se utiliza la máquina inyectora Arburg Allrounder modelo 221K de 35 toneladas de fuerza de cierre y 49 cm³ de capacidad de inyección, además de un molde ISO del tipo A de dos cavidades con canal de alimentación en forma de Z, ambos mostrados en la Fig. 7 Con dicha máquina se pretende fabricar tanto fibras de polietileno recicladas como probetas normalizadas que permitan el estudio del material.



Fig. 7. Máquina de inyección (izq.) y molde utilizado (dcha.).

El proceso de inyección consiste en:

- Plastificar y homogeneizar con ayuda de calor el material plástico introducido en la tolva y que posteriormente entrará por la garganta del cilindro.
- Inyectar el material fundido por medio de presión en las cavidades del molde, en las cuales adoptará la forma o figura que tenga dicho molde.

- c) Al mismo tiempo que el plástico se enfria dentro del molde se lleva a cabo el paso "a", posteriormente se abre el molde y se expulsa la pieza moldeada.

En el caso concreto del polietileno los parámetros introducidos en la máquina de inyección con lo que se obtiene una calidad óptima son:

- Temperatura del cilindro: 230°C
- Presión de inyección: 1000 bar
- Presión de mantenimiento: 800 bar
- Volumen de dosificación: 29 cm³

El ciclo automático de inyección utilizado consta de 7 fases, se encuentra detallado en la Fig. 8:

- 1) Cierre del molde.
- 2) Avance de la unidad de inyección.
- 3) Inyección del material en el molde.
- 4) Mantenimiento de la presión o postpresión.
- 5) Dosificación y descompresión.
- 6) Retroceso de la unidad de inyección.
- 7) Apertura del molde y expulsión de la pieza

Entre la fase 5 y la 7 se lleva a cabo de forma simultánea la refrigeración (R) y solidificación de la pieza (comienza al terminar la inyección y dura hasta que empieza la apertura del molde).

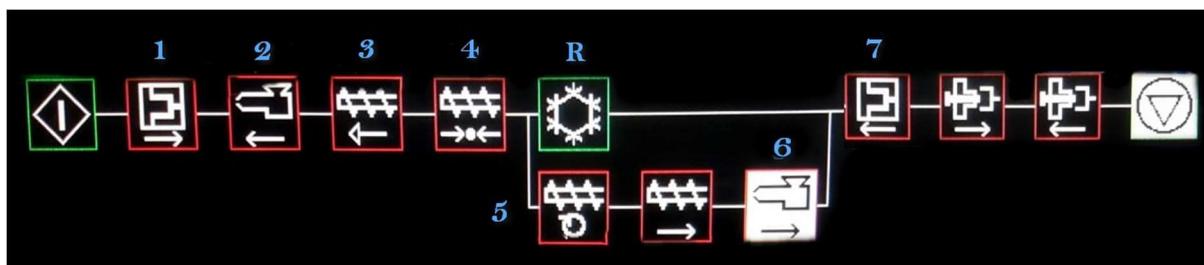


Fig. 8. Ciclo automático moldeo por inyección.

2.2 Caracterización del polietileno

En este apartado del trabajo se procede a caracterizar tanto el polietileno original, al que a partir de ahora abreviaremos como "PT", como el polietileno reciclado, al que llamaremos "PR". El objetivo es comparar ambos materiales y analizar sus prestaciones.

2.2.1 Densidad del polietileno

Para la determinación de la densidad tanto del PT como del PR se utilizó el ensayo del picnómetro Le Chatelier, que se puede ver en la Fig. 9. Determinación de la densidad del polietileno mediante el picnómetro Le Chatelier. Es un procedimiento similar al que se usa en la norma EN ISO 1183-1 "Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Método de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración." [49].

El equipo necesario para llevar a cabo el ensayo consta de un horno, una balanza de precisión (resolución de 0.01 g), un picnómetro Le Chatelier de 24 cm³ y propanol como líquido de inmersión.

El procedimiento seguido se describe a continuación:

Se toma una muestra de granza en un cacito y se introduce en un horno a 70°C durante 2 horas para eliminar la humedad que haya podido absorber.

Cumplido el tiempo previsto se saca la muestra y se deja atemperar unos minutos antes de realizar el pesaje inicial (P_i).

Una vez limpiado y secado el picnómetro se procede a verter el propanol hasta que el nivel de líquido alcance un nivel comprendido entre 0 y 1 cm³, se toma este dato como el volumen inicial (V_i), teniendo en cuenta la parte inferior del casquete esférico generado por la burbuja de aire.

Se comienza a introducir los gránulos en el recipiente lentamente y en pequeñas cantidades, intentando evitar que se produzcan tapones, salpicaduras o que el material se adhiera a las paredes del matraz. El proceso continúa hasta que el líquido llega hasta las marcas superiores del picnómetro. Después se verter el polímero se procede a agitar el recipiente de forma circular facilitando la eliminación de aire y se deja reposar durante unos minutos.

Por último, se anota el valor de volumen final (V_f) del picnómetro teniendo en cuenta la burbuja como se hizo anteriormente. También se pesa el cacito con la muestra restante, siendo este dato el peso final (P_f).

La densidad real del polietileno se calcula como el incremento del peso entre el incremento del volumen (4).

$$D_R = \frac{P_i - P_f}{V_i - V_f} \quad (1)$$



Fig. 9. Determinación de la densidad del polietileno mediante el picnómetro Le Chatelier.

2.2.2 Ensayo de resistencia a tracción

El ensayo de tracción consiste aplicar progresivamente una fuerza a una probeta de modo que esta se alarga longitudinalmente. La carga se suministra por medio del actuador de la máquina de ensayos trabajando en control de posición, hasta que se produce la rotura la probeta [50].

La determinación de la resistencia a tracción de las probetas normalizadas se basa en la norma UNE-EN ISO 527-1:2012 “*Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales*” [51].

Para llevar a cabo la prueba de tracción se usa la máquina de ensayos universal SERVOSIS, como puede verse en la Fig. 10. Inicialmente, se enroscan las mordazas planas procurando que estén paralelas entre sí, se enciende la máquina y se conecta el grupo hidráulico. A continuación, se configura el software de control. El ensayo se realiza en control de posición, utilizando una función rampa, la velocidad de ensayo introducida es de 1 mm/s y la posición final de 300 mm.

Las probetas se fijan entre las mordazas del equipo y se comprueba que se encuentren estiradas, pero sin carga. Una vez hecho esto se mide la longitud entre mordazas con un calibre, éste dato se corresponderá con la longitud inicial (L_0). Durante el ensayo se registran los valores de desplazamiento del cabezal superior y los proporcionados por la célula de carga de la máquina.



Fig. 10. Ensayo de tracción con la máquina de ensayos SERVOSIS.

Por último, una vez obtenidos los datos de fuerza y desplazamiento, se procede a dibujar el diagrama normalizado tensión-deformación mediante las ecuaciones (2) y (3).

$$\varepsilon = \frac{P_f - P_0}{L_0} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{b_1 \times h} \quad (3)$$

Donde:

- F es la fuerza, en N, registrada para cada instante de tiempo.
- P_0 es la posición inicial, en mm, del brazo móvil.
- P_f es la posición final, en mm, del brazo móvil para cada instante de tiempo.
- σ es la tensión, en MPa, para cada instante de tiempo.
- ε es la deformación, en %, para cada instante de tiempo.

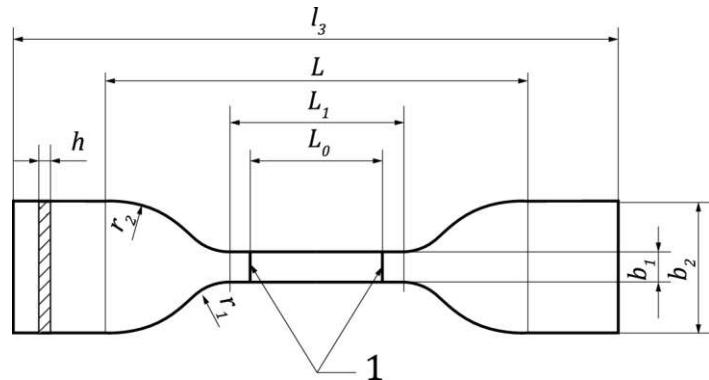
El procedimiento definido va a ser usado para la caracterización mecánica del polietileno original, del polietileno reciclado y de las fibras de polietileno reciclado. La única diferencia entre los tres ensayos es la geometría de la muestra utilizada, las cuales van a ser descritas a continuación:

Probetas de polietileno original

Las probetas de polietileno original se obtienen directamente de los tubos recogidos de la planta de residuos. Inicialmente se limpian las tuberías y se cortan por la mitad con una sierra eléctrica. A continuación, las tuberías son aplanadas y troqueladas mediante una cuchilla con la forma de una

probeta normalizada, mostrada en la Fig. 11 Ambas operaciones se realizan en una prensa servo hidráulica universal de la manera que se ve en la fotografía de la

Fig. 12. Las probetas obtenidas son en forma de halterio del tipo 5 y sus dimensiones se presentan en la Fig. 13.



Leyenda

- 1 Marcas
- b_1 Anchura de la parte estrecha: $6 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$
- b_2 Anchura en los extremos: $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$
- h Espesor: $\leq 1 \text{ mm}$
- L_0 Distancia entre marcas: $25 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$
- l_1 Longitud de la parte estrecha: $33 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$
- L Distancia inicial entre mordazas: $80 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
- l_3 Longitud total: $\geq 115 \text{ mm}$
- r_1 Radio menor: $14 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$
- r_2 Radio mayor: $25 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

Fig. 11. Probeta normalizada de tracción tipo 5 [52].



Fig. 12. Cuchilla con forma de probeta de halterio normalizada.

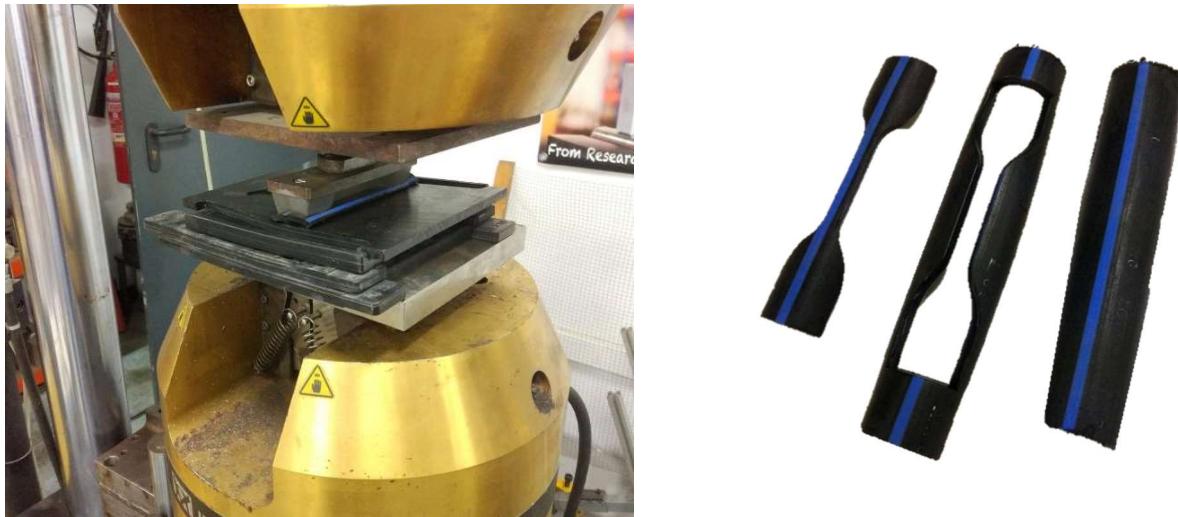
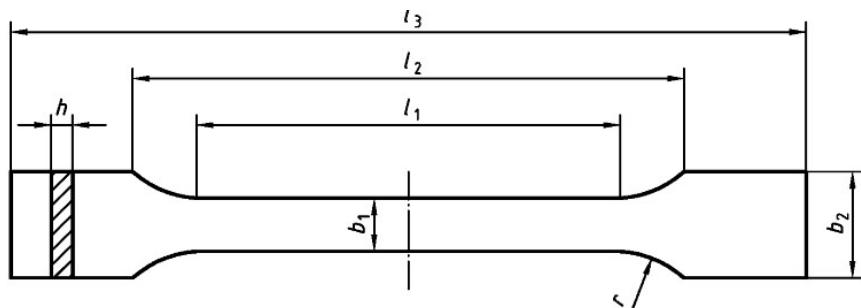


Fig. 13. Troquelado tuberías con la prensa (izq.) y obtención de probetas normalizadas (dcha.).

Probetas de polietileno reciclado

La fabricación de las probetas de polietileno reciclado se lleva a cabo mediante moldeo por inyección. Para ello se usa un molde para probetas de tracción normalizadas de halterio tipo 1A, cuyas dimensiones se muestran en la Fig. 14, tal como marca la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 “Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión”[53].



Leyenda

- b_1 Anchura de la parte estrecha: $10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$
- b_2 Anchura en los extremos: $20 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$
- h Espesor: $4 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$
- l_1 Longitud de la parte estrecha: $33 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$
- l_2 Distancia entre las partes anchas: $109,3 \text{ mm} \pm 3,2 \text{ mm}$
- l_3 Longitud total: 170 mm
- r Radio: $24 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

Fig. 14. Probeta normalizada de tracción tipo 1A [52].

En la Fig. 15 se aprecia la disposición de las probetas en la máquina de ensayos. En la Fig. 16 se muestra en detalle una probeta de halterio antes y después de ser ensayada a tracción.



Fig. 15. Ensayo tracción probetas polietileno reciclado.



Fig. 16. Resultado probeta rota mediante ensayo de tracción.

Fibras de polietileno reciclado

En este caso se utilizan fibras de polietileno reciclado como se muestra en la Fig. 17. La caracterización geométrica de las fibras se explica posteriormente en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Cabe destacar que la velocidad de ensayo para las fibras se ajusta a 2 mm/s con el fin que el tiempo de ensayo (aproximadamente un minuto) sea el mismo para las tres geometrías.



Fig. 17. Ensayo tracción fibra de polietileno reciclada.

2.2.3 Ensayo de dureza con el durómetro shore

La dureza se puede definir como la resistencia que un material ofrece a adquirir deformaciones, en particular, plásticas y permanentes.

Para el caso del polietileno se ha determinado la dureza de penetración mediante el durómetro tipo D, tal como marca la norma UNE-EN ISO 868:2003 “*Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore)*” [54]. La dureza Shore es inversamente proporcional a la profundidad de la penetración y a la fuerza aplicada.

El procedimiento seguido es el siguiente:

Se coloca la probeta sobre una superficie dura y plana. Se coloca el durómetro en posición vertical sobre la probeta teniendo en cuenta que tiene que haber al menos 9 mm de separación con el borde de ésta. A continuación, se aplica una presión en el durómetro de manera que el pie de apoyo se mantenga en contacto firme con la probeta. Se mantiene la presión durante 15 segundos y se lee la medida del dispositivo indicador. La medición se realiza 3 veces en distintos puntos de la probeta, dejando un mínimo de 6 mm, y se calcula el valor medio. Esta operación se ha llevado a cabo para un total de 20 probetas entre PT y PR. El durómetro tipo D usado puede observarse en la Fig. 18.



Fig. 18. Durómetro Shore tipo D.

2.3 Proceso fabricación de las fibras

El proceso de fabricación de las fibras de polietileno comienza de la misma manera que la descrita en el apartado 2.1, las tuberías se limpian, se Trituran y por último se inyectan.

La máquina utilizada está diseñada para trabajo de moldeo por inyección, por ello, la solución adoptada es utilizar el ciclo de purga de la máquina. De esta forma conseguimos que el polímero fundido salga con una presión controlada por la boquilla, de 1 mm de diámetro, obteniendo así la forma deseada. La purga es un método usado habitualmente en la industria para limpiar el barril y el tornillo, y desplazar por completo las resinas de la máquina, con el objetivo de prevenir la contaminación y la formación de depósitos.

El procedimiento seguido es el siguiente:

Se conecta la máquina y se encienden las resistencias del cilindro para conseguir la temperatura de inyección requerida, este caso de 230°C. A continuación, se introduce el material triturado en la tolva, previo secado de 2 horas en un horno a 60°C y se comienza a llenar el cilindro con la dosificación necesaria, el volumen de dosificación utilizado aquí es de 29 cm³. En cuanto a la presión introducida, tras varias pruebas se llegó a la conclusión que la presión óptima para conseguir una fibra con un diámetro entre 1-2 mm y que además adquiriera cierta rugosidad era con una presión de 150 MPa. Una vez realizado todos los ajustes de la máquina se comienza el ciclo de purga.

Al momento de salir el material inyectado se procede a traccionar manualmente la fibra teniendo la precaución de no disminuir demasiado la sección. Aproximadamente a 9 metros de la máquina se coloca la bobina, mostrado en la Fig. 19Fig. 9, con la que se enrollaba el hilo.

La bobina se construyó con anterioridad con material reutilizado procedente del taller del LADICIM.

Por último, se hace un control de calidad visual a las bobinas de fibras para descartar los tramos que no tengan la sección apropiada o cuya superficie sea lisa y se procede a cortar manualmente las fibras con una longitud de 6, dejando una tolerancia de $\pm 0,5$ cm por los posibles errores cometidos durante el corte.

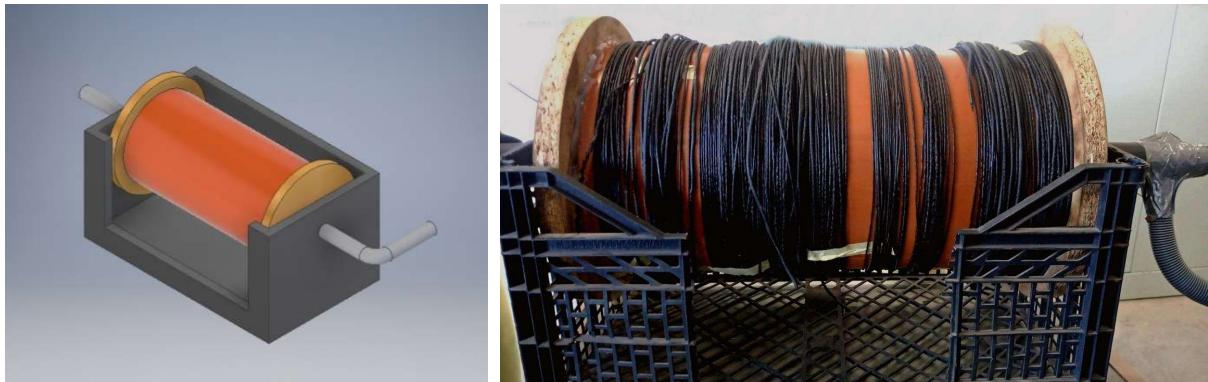


Fig. 19. Prototipo de bobina de fibras (izq.) y bobina fabricada con material reutilizado (dcha.).

2.4 Caracterización de las fibras de polietileno

Las fibras poliméricas usadas en el hormigón han de satisfacer las prestaciones tanto mecánicas como geométricas requeridas en la norma UNE-EN 14889-2:2008. “*Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad*” [22].

Las propiedades de las fibras de PE afectan directamente a las prestaciones del hormigón, tanto física como mecánicamente. Para la caracterización se realiza un análisis dimensional de la fibra y un estudio de su comportamiento a tracción.

2.4.1 Dimensiones

Las propiedades geométricas se determinan midiendo la sección de las fibras con la ayuda de un pie de rey. Se utiliza una muestra aleatoria de 100 fibras. Debido la irregularidad superficial que presentan, se realiza tres mediciones del diámetro a lo largo de la toda la fibra y se calcula el promedio. En la Fig. 20 se muestra en detalle una fibra.



Fig. 20. Detalle fibra de polietileno reciclada.

2.4.2 Rugosidad superficial

Se lleva a cabo un análisis superficial de la fibra, ya que juega un papel fundamental en la adherencia con la matriz de hormigón, calculando los parámetros de rugosidad de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 4287:1999. "Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial" [55]. Para el análisis de la rugosidad de las fibras se ha utilizado una mesa tridimensional, como se muestra en la Fig. 21.

El procedimiento seguido consiste en posicionar la muestra sobre la mesa tridimensional y con ayuda de un láser realizar un recorrido paralelo al eje longitudinal de la misma, de manera que se obtiene un perfil de alturas.

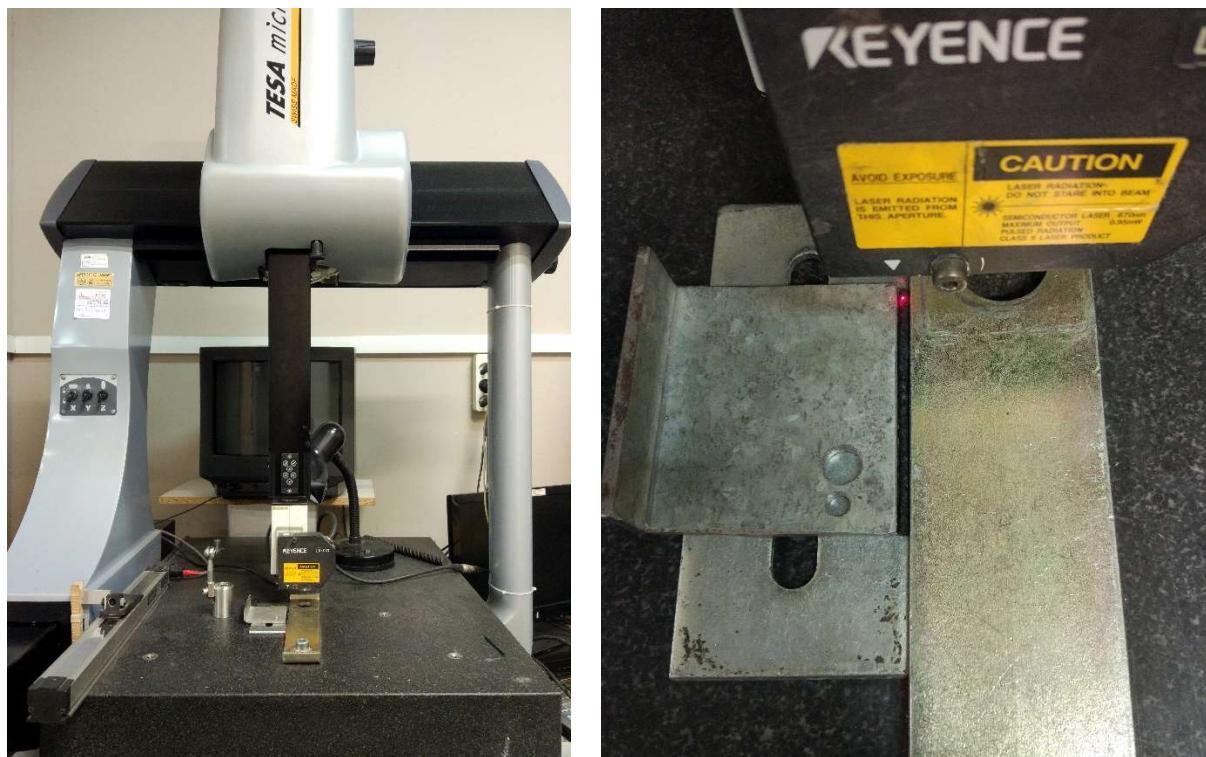


Fig. 21. Mesa tridimensional (izq.) y detalle medición de la fibra (dcha.).

Una vez obtenido el perfil de alturas se procede a calcular la rugosidad media aritmética (R_a). Este parámetro de rugosidad se define como la media aritmética de los valores absolutos de

las coordenadas de los puntos de perfil de rugosidad con relación a la línea media dentro de la longitud de evaluación (L_n). El primer paso es establecer la línea media, dicha línea separa el perfil en dos partes de modo que la suma de las áreas por encima de ella sea exactamente igual a la suma de las áreas que están por debajo. La rugosidad media se obtiene como la altura de un rectángulo cuya área sea igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la línea media, tal como se muestra en la ecuación (4).

$$Ra = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} |y| \cdot dx \quad (4)$$

Donde:

- Ra es la rugosidad media, en mm.
- L_n es la longitud de evaluación, en mm.
- y representa cada valor de altura del perfil, en mm.
- dx representa el incremento de posición para cada valor de altura, en mm.

2.5 Hormigón estructural

2.5.1 Materiales

Para este trabajo se ha usado un cemento Portland tipo CEM III 32.5 SR, según la norma UNE-EN 197-1:2011. “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes”. La mezcla de hormigón se ha fabricado con arena 0-2 mm, arena 0-3 mm y gravilla 6-12 mm. Las curvas granulométricas de los agregados se muestran en la Fig. 22Fig. 1. Además, se ha usado un aditivo MasterEase 3850 superplastificante reductor de agua y fibras de polietileno reciclado.

En total se han fabricado 3 hormigones distintos, un hormigón de control (HFC), un hormigón reforzado con fibras con un volumen de 4 kg/m³ (HRFP-4) y finalmente un hormigón reforzado con fibras con un volumen de 2 kg/m³ (HRFP-2). La cantidad de material utilizado se calcula siguiendo la dosificación indicada en la

Tabla 3, obteniendo que para una amasada de 38 litros se necesita: 13,3 kg de cemento, 7,98 kg de agua, 22,80 kg de gravilla 6/12, 30,40 kg de arena 0/3, 23,67 kg de arena 0/2, 0,2 kg de aditivo EASE y por último 0,08 kg y 0,152 kg de fibra para los hormigones HRFP-2 y HRFP-4 respectivamente.

Tabla 3. Dosificaciones del hormigón.

Material	Control	Contenido fibras	
		alto	bajo
Cemento(kg/m³)	350	350	350
Agua (kg/m³)	210	210	210
Arena 0/2 (kg/m³)	800	800	800
Arena 0/3 (kg/m³)	623	623	623

Gravilla 6/12 (kg/m³)	600	600	600
Superplastificante (kg/m³)	5,3	5,3	5,3
Fibras polietileno (kg/m³)	-	4	2
Agua/cemento	0,6	0,6	0,6

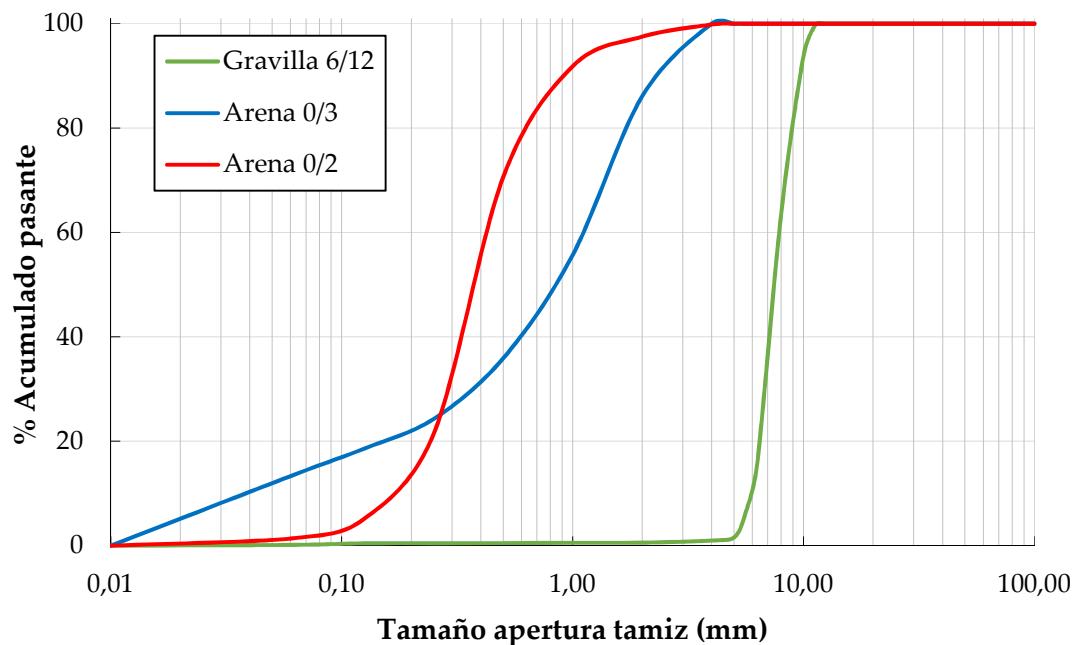


Fig. 22. Curvas granulométricas de los áridos.

2.5.2 Procedimiento de amasado

Las prestaciones del hormigón dependen en gran medida de su proceso de elaboración. Por ello, ha de asegurarse que la mezcla obtenida sea lo más homogénea posible, evitando así la segregación de sus componentes, igualmente hay que procurar que la pasta recubra totalmente a los áridos, así como la correcta mezcla del aditivo con el agua.

El equipo necesario para la realización de las amasadas es el siguiente:

- Amasadora de hormigón de eje vertical.
- Báscula de precisión calibrada con una resolución de 0,1 g y capacidad para 50 kg.
- Cronómetro digital para el control de los tiempos de amasado.
- Moldes normalizados para la fabricación de probetas de hormigón:
 - Cilindros de 300 mm de altura y 150 mm de diámetro.
 - Cubos de 15 mm de lado.
- Herramientas de trabajo: guantes, cascos de protección auditiva, paletas, cogedores, capazos, manguera de agua y matraces.
- Cámara de curado con humedad relativa igual o superior al 95% y una temperatura de 20 ± 2 °C.

El procedimiento seguido para la fabricación de las probetas de hormigón se describe a continuación:

El primer paso es calcular las cantidades requeridas de material para un volumen de amasada de 38 litros, según las dosificaciones propuestas anteriormente en la

Tabla 3. Seguidamente se procede al pesaje de los áridos, el cemento, el aditivo, las fibras y el agua, tal y como se muestra en la Fig. 23. A continuación, se mezcla el aditivo con una pequeña cantidad del agua de amasado para evitar que éste se quede pegado en las paredes del matraz.



Fig. 23. Materiales usados para la fabricación del hormigón con fibras.

Se procede a la limpieza tanto del interior de la hormigonera como de los utensilios de trabajo con agua, para que las condiciones de las distintas amasadas sean lo más similares posible.

Se introducen los áridos en la hormigonera de mayor a menor tamaño: grava (6/12), arena (0/3), arena (0/2) y cemento. Y se dan 2 vueltas a la hormigonera para homogeneizar la mezcla.

Se pone en marcha la amasadora a la vez que el cronómetro, añadiendo progresivamente el agua de amasado durante los primeros 15 segundos. Se amasa durante 3 minutos y se para la hormigonera, dejando reposar la mezcla otros 3 minutos. En la fase de reposo se incorporan las fibras (si las hay) por toda la superficie libre del hormigón, como se aprecia en la Fig. 24.



Fig. 24. Incorporación de las fibras en el hormigón.

Una vez pasado el tiempo de reposo se pone nuevamente la máquina en funcionamiento y se añade el aditivo en los primeros 15 segundos. Esta última fase de amasado dura 2 minutos y en ella es preciso controlar la formación de erizos o bolas de las fibras.

Transcurridos los 8 minutos totales de amasado se vierte el hormigón en un capazo, en este momento el hormigón ya está preparado para someterse al ensayo de consistencia y para la fabricación de las probetas normalizadas, como se muestra en la Fig. 25.



Fig. 25. Fabricación probetas normalizadas (izq.) y probetas desmoldadas y etiquetadas (dcha.).

2.5.3 Consistencia del hormigón fresco

El ensayo de consistencia de hormigón fresco del cono de Abrams se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 12350-2:2009. "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento" [56]. El material necesario para este ensayo es el siguiente: un molde con forma de cono truncado,

una chapa rígida de acero como base, una barra de acero de 16 mm de diámetro acabada en punta para la compactación y una cinta métrica con la que se obtiene la medida del descenso del cono de Abrams.

Este ensayo consiste en verter el hormigón en un molde cónico que se encuentra apoyado sobre una chapa de acero que actúa como base. El proceso normalmente se realiza entre dos personas, mientras una de ellas sujetá firmemente las aletas del cono contra la chapa para evitar que salga material, la otra se encarga de llenar el cono. Se vierte hormigón hasta llenar 1/3 de la altura del cono, inmediatamente la persona que aguanta el cono compacta la masa dando 25 golpes con la barra de acero y formando una espiral de fuera hacia adentro. Se continúa llenando el molde hasta alcanzar los 2/3 de altura y se compacta de la misma manera que la anteriormente explicada, teniendo en cuenta que se ha de atravesar con la barra las 2 tongadas echadas hasta el momento. Finalmente, se completa el último tercio del molde y se compacta siguiendo el proceso anterior.

El siguiente paso es enrasar la superficie del cono con una paleta y retirar el material sobrante de la chapa que se haya derramado durante el llenado. A continuación, se levanta el cono con la mayor rapidez posible, evitando general un vacío que adhiera el hormigón al molde.

Para medir la pérdida de altura del cono (h), se utiliza el propio molde y la barra de compactación tal y como se muestra en la Fig. 26.



Fig. 26. Medida de la altura del cono de Abrams.

La pérdida de altura refleja la consistencia del hormigón, es un parámetro que depende del tamaño máximo del árido, de la relación agua/cemento, del aditivo y también puede verse afectado por el uso de fibras. La consistencia buscada depende principalmente del uso al que vaya destinado el hormigón.

2.5.4 Propiedades físicas del hormigón

Para realizar los ensayos de caracterización física del hormigón, se utilizan muestras obtenidas del corte del cilindro normalizado de 300 mm de altura y 150 mm de diámetro en 3 partes, como se esquematiza en la Fig. 27.

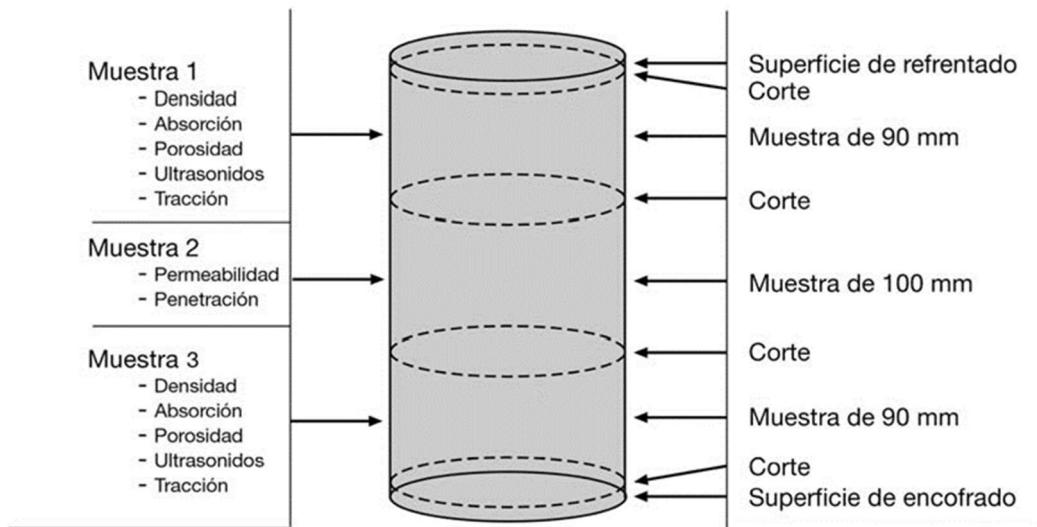


Fig. 27. Esquema de los cortes realizados a la probeta cilíndrica normalizada [57].

Para el corte de las probetas se ha utilizado una sierra de disco. Se comienza cortando un espesor de 10 mm en ambos extremos de la probeta, que se corresponden con la superficie de refrentado (cara superior) y con la superficie de encofrado (cara inferior). Seguidamente se cortan dos muestras de aproximadamente 90 mm de espesor, quedando la muestra correspondiente al tercio medio de la probeta, de unos 100 mm de espesor.

Las muestras de 90 mm se utilizan para los ensayos de densidad aparente y relativa, coeficiente de absorción y porosidad accesible. La muestra de 100 mm se destina para los ensayos de permeabilidad al oxígeno y al agua bajo presión.

2.5.4.1 Propiedades físicas

El procedimiento seguido para la determinación de las propiedades físicas del hormigón reforzado con fibras tales como la densidad, la porosidad y el coeficiente de absorción está basado en la norma UNE-EN 12390-7:2009. *"Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido"*[58]. Para la realización de estos ensayos se utilizan las dos muestras de 90 mm obtenidas de una probeta cilíndrica tal y como se indica en el apartado anterior.

Para el cálculo del peso seco (P_s) se mantienen las probetas en una estufa a 105°C hasta que el peso de las muestras permanece constante, este proceso lleva aproximadamente 24 horas.

Para el cálculo del volumen aparente (V_a) se colocan las muestras en un recipiente y se las somete a vacío durante 24 horas, como se muestra en la Fig. 28, con el objetivo de extraer todo el aire de los poros. A continuación, se procede a llenar el recipiente con agua, que junto con la sobrepresión generada por el vacío hace que los poros se llenen de agua, permanece así 24 horas. Pasado el tiempo requerido se quita el vacío dejando las probetas sumergidas en agua

a presión atmosférica durante otras 24 horas. Una vez terminado el proceso se secan las muestras superficialmente y se pesan, obteniendo así el peso saturado con superficie seca (P_{sss}). Una vez pesadas las probetas se procede a sumergirlas de nuevo en agua para determinar el volumen aparente de las mismas, como se puede ver en la Fig. 29. Para dicho cálculo se utiliza una balanza donde se sumergen las muestras con ayuda de un cordel. La balanza se tara con el recipiente lleno de agua y el cordel sumergido antes de cada medición.

El pesaje realizado con la balanza hidrostática proporciona directamente el volumen de agua desplazado por la muestra (V_a), ya que la densidad del agua en condiciones de laboratorio puede considerarse $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$.

Además, se puede calcular el volumen de poros accesible (h_a) como la diferencia entre el peso saturado con superficie seca y el peso seco (5). Siendo la relación entre el volumen de poros accesible y el volumen aparente en tanto por cien la porosidad accesible del material (6).

Con los resultados anteriores y la formulación que marca la norma se obtienen el volumen relativo (7), la densidad aparente (8) y la densidad relativa (4).

El cálculo del coeficiente de absorción se determina como la relación entre el volumen de poros accesible y el peso seco, como muestra la ecuación (4).

$$h_a = P_{sss} - P_s \quad (5)$$

Donde:

- h_a es el volumen de poros accesible, en cm^3 .
- P_s es el peso seco, en g.

$$\text{Porosidad} = \frac{h_a}{V_a} \times 100 \quad (6)$$

$$V_r = V_a - h_a \quad (7)$$

Donde:

- V_r es el volumen relativo, en cm^3 .
- V_a es el volumen aparente, en cm^3 .

$$D_a = \frac{P_s}{V_a} \quad (8)$$

Donde:

- D_a es la densidad aparente, en g/cm^3 .

$$D_r = \frac{P_s}{V_r} \quad (9)$$

Donde:

- D_r es la densidad relativa, en g/cm^3 .

$$Absorción = \frac{h_a}{P_s} \times 100 \quad (10)$$



Fig. 28. Esquema del dispositivo de vacío para el ensayo de densidad.

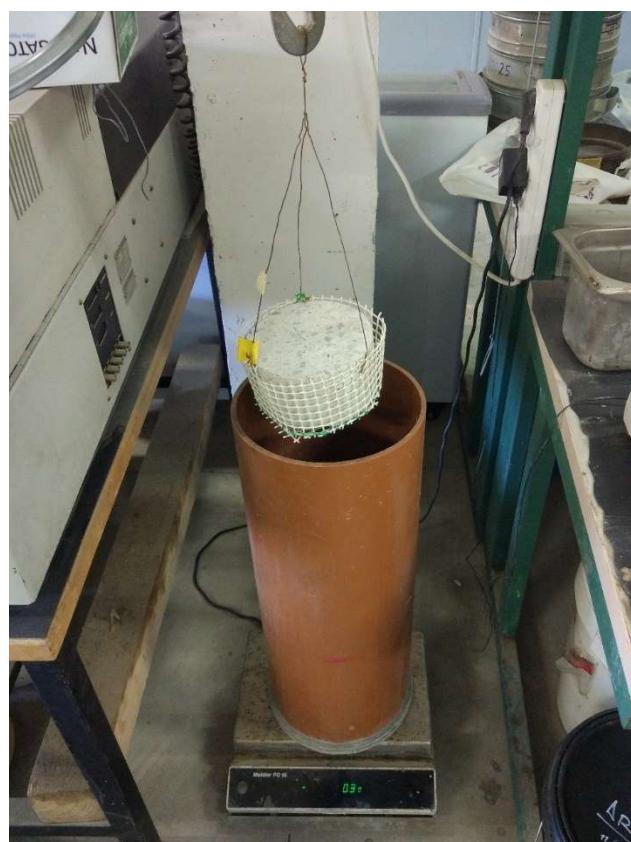


Fig. 29. Medición del volumen aparente con balanza hidrostática.

2.5.4.2 Determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno

El ensayo de permeabilidad al oxígeno se realiza atendiendo a lo establecido en las normas UNE 83966:2008. *"Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad"* [59] y UNE 83981:2008. *"Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido"* [60]. Para realizar este ensayo se toma la muestra que corresponde al tercio medio de 100 mm obtenida del corte de una probeta cilíndrica de la manera expuesta con anterioridad.

Inicialmente, la muestra se coloca en una estufa a 105°C hasta conseguir que el peso se mantenga constante. Una vez secado se toma el valor de la altura de cada probeta mediante un calibre, para cálculos posteriores, y se procede a recubrir lateralmente las probetas con dos capas de silicona, con el objetivo de evitar posibles fugas de oxígeno durante el ensayo. La probeta es introducida en una junta de caucho y colocada en un soporte metálico donde se sellan firmemente con ayuda de un gato hidráulico.

El siguiente paso es abrir ligeramente la botella de oxígeno, para que éste entre por la cara superior de la probeta, saliendo por la cara inferior. Dicha superficie se encuentra conectada a un caudalímetro digital encargado de registrar las lecturas de caudal de oxígeno que pasa por la probeta. La disposición del ensayo de puede apreciar en la Fig. 30.

El ensayo se inicia ajustando un manómetro conectado a la entrada de la probeta a una presión de 2 bares. Se espera media hora para que el valor del caudal de estabilice y se anota dicha medida (Q_1). Por otro lado, hay que anotar el valor inicial (Q_0) del caudalímetro retirando el tubo que lo alimenta. La lectura final (Q) será la suma de ambos valores (4).



Fig. 30. Disposición del ensayo de permeabilidad al oxígeno.

A continuación, se repite todo el proceso anterior elevando la presión del manómetro de 2 a 3 bares.

Se calcula el coeficiente de permeabilidad al oxígeno (K) a partir de la ecuación (4).

$$Q = Q_0 + Q_1 \quad (11)$$

$$K = \frac{2 \cdot P_a \cdot Q \cdot L \cdot \eta}{A \cdot (P^2 - P_a^2)} \quad (12)$$

Donde:

- K es el coeficiente de permeabilidad al oxígeno, en m^2 .
- Q es el flujo de oxígeno que atraviesa la probeta, en m^3/s .
- P_a es la presión atmosférica, en N/m^2 .
- L es la altura de la probeta, en m .
- η es la viscosidad del oxígeno, para 20°C se considera igual a $2,02 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$.
- A es la sección de la probeta, en m^2 .
- P es la presión a la salida de la muestra, en N/m^2 .

Una vez obtenido el coeficiente de permeabilidad se puede utilizar la Tabla 4 como referencia para clasificar el hormigón con respecto a su permeabilidad al oxígeno.

Tabla 4. Clasificación de hormigones en función de su permeabilidad al oxígeno [61].

$K \cdot 10^{-16} (\text{m}^2)$	Permeabilidad
< 0,01	Muy baja
0,01 – 0,1	Baja
0,1 – 1	Moderada
1,0 – 10	Alta
> 10	Muy alta

2.5.4.3 Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión

El ensayo de permeabilidad al agua bajo presión se determina de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-8:2008. “*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración al agua bajo presión*” [62]. Para este ensayo se utilizan las mismas muestras que han sido usadas para determinar la permeabilidad al oxígeno.

El procedimiento consiste en someter a las probetas a agua bajo una presión de 5 bares, lo que equivaldría a tener una columna de agua de 50 m, durante 72 horas, con la disposición mostrada en la Fig. 31.

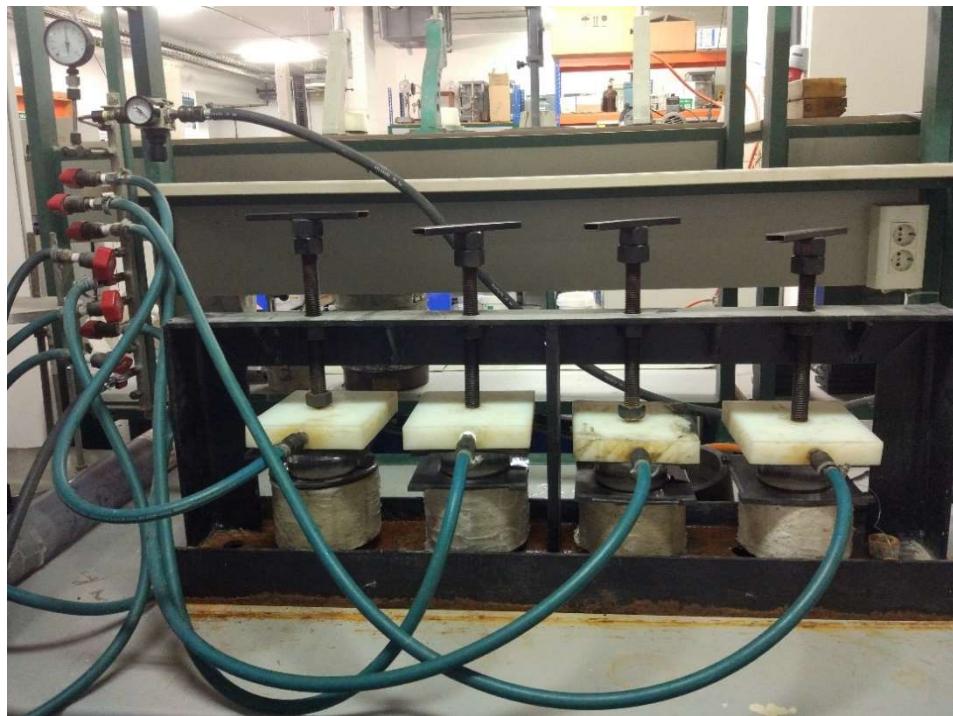


Fig. 31. Disposición ensayo permeabilidad al agua bajo presión.

Transcurrido este tiempo las probetas se someten al ensayo de tracción indirecta, de manera que, además de obtener la resistencia a tracción, separamos la muestra en dos mitades con lo que podemos medir la profundidad de penetración del agua en el hormigón.

Se procede a perfilar el contorno de la huella de humedad que ha penetrado con un rotulador permanente, como se muestra en la Fig. 32, y se mide el máximo valor de penetración del agua.



Fig. 32. Ejemplo de la huella de humedad dejada por el agua.

2.5.5 Propiedades mecánicas del hormigón

2.5.5.1 Determinación de la resistencia a compresión uniaxial

La determinación de resistencia a compresión uniaxial se basa en la norma UNE-EN 12390-3. “*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*” [63]. En este ensayo se utilizan probetas cúbicas normalizadas de 15 cm de lado.

Para realizar el ensayo se utiliza una prensa servohidráulica universal, donde se colocan las probetas de forma que la cara lisa sea la que está sometida a la carga. Se usa una velocidad de carga correspondiente a un incremento de la tensión de 0,5 MPa/s.

Una vez obtenidos los valores de carga máximos se procede a calcular la resistencia a compresión mediante la ecuación (13).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (13)$$

Donde:

- f_c es resistencia a compresión, en MPa.
- F es la carga máxima de rotura, en N.
- A_c es el área transversal de la probeta, en mm^2 .

2.5.5.2 Determinación de la resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta o método brasileño se ejecuta según lo establecido en la norma UNE-EN 12390-6. “*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas*” [64]. Este ensayo se ha llevado a cabo con las muestras cortadas de las probetas cilíndricas normalizadas.

Antes de proceder al ensayo es necesaria una caracterización geométrica de la probeta.

Para llevar a cabo el ensayo se coloca una probeta cilíndrica en una prensa servohidráulica universal, Fig. 33 y se la aplica una carga homogénea hasta rotura. El incremento de tensión escogido es de 0,05 MPa/s, siendo la velocidad de carga requerida (R) calculada con la fórmula (14).



Fig. 33. Ensayo de tracción indirecta.

Finalmente, con los datos de carga obtenidos se calcula la tracción indirecta mediante la ecuación (4).

$$R = \frac{s \times \pi \times L \times d}{2} \quad (14)$$

Donde:

- R es la velocidad de carga requerida, en N/s.
- L es la longitud de la probeta, en mm.
- d es la dimensión de la sección transversal de la probeta, en mm.
- s es el incremento de tensión, en MPa/s.

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (15)$$

Donde:

- f_{ct} es la resistencia a tracción indirecta, MPa.
- F es la carga máxima, en N.
- L es la longitud de la línea de contacto de la probeta, en mm.
- d es la dimensión de la sección transversal, en mm.

3. Resultados y análisis

3.1 Caracterización de reciclados de polietileno

3.1.1 Densidad del polietileno

En la Tabla 5. Medidas tomadas en el cálculo de la densidad del polietileno original. Tabla 5 y en la Tabla 6 se muestran los datos tomados para la determinación de la densidad del polietileno original y del polietileno reciclado respectivamente.

Tabla 5. Medidas tomadas en el cálculo de la densidad del polietileno original.

Muestra	Peso inicial (g)	Volumen inicial (cm ³)	Peso final (g)	Volumen final (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
Muestra 1	594,43	0,9	573,88	23,2	0,921
Muestra 2	568,34	0,8	553,31	23,3	0,922
Muestra 3	573,88	0,8	547,78	23,1	0,914

Tabla 6. Medidas tomadas en el cálculo de la densidad del polietileno reciclado.

Muestra	Peso inicial (g)	Volumen inicial (cm ³)	Peso final (g)	Volumen final (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
Muestra 1	127,00	0,6	106,08	23,4	0,921
Muestra 2	106,09	0,9	85,43	23,2	0,922
Muestra 3	85,43	0,9	65,04	23,2	0,914

Con los datos de densidad calculados para cada muestra obtenemos que el promedio para el polietileno original es de 0,92 g/cm³, en el caso del polietileno reciclado el valor medio vuelve a ser de 0,92 g/cm³. El hecho de que la densidad se mantenga constante nos indica que el proceso de reciclaje no ha afectado dicha propiedad. Además, se puede observar cómo los resultados de las seis muestras son homogéneos. Por lo tanto, podemos concluir que el material mantiene constante sus propiedades físicas tras el reciclaje.

3.1.2 Propiedades mecánicas

Polietileno original

En la Fig. 34 se representan las curvas tensión-deformación obtenidas con el ensayo de tracción. El módulo elástico del material se calcula usando el tramo elástico lineal de la curva, para ello se realiza un ajuste lineal de los valores de tensión que se encuentran entre el 0% y 5% de deformación, como se muestra en la Fig. 35.

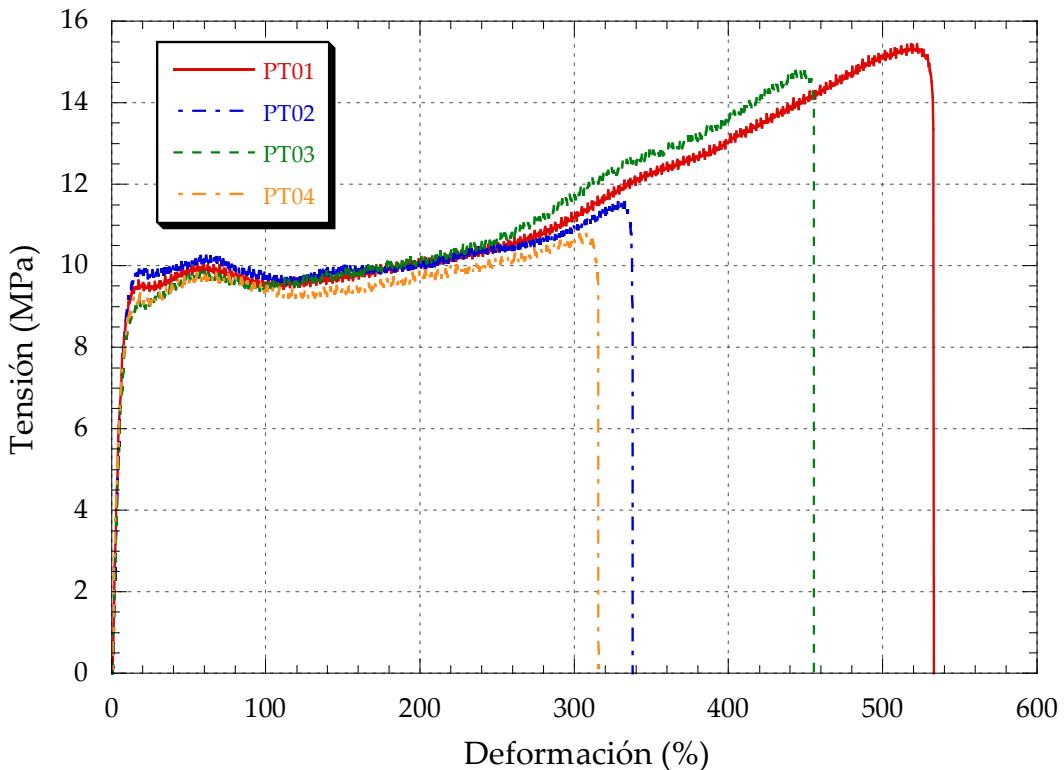


Fig. 34. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de tracción del PT.

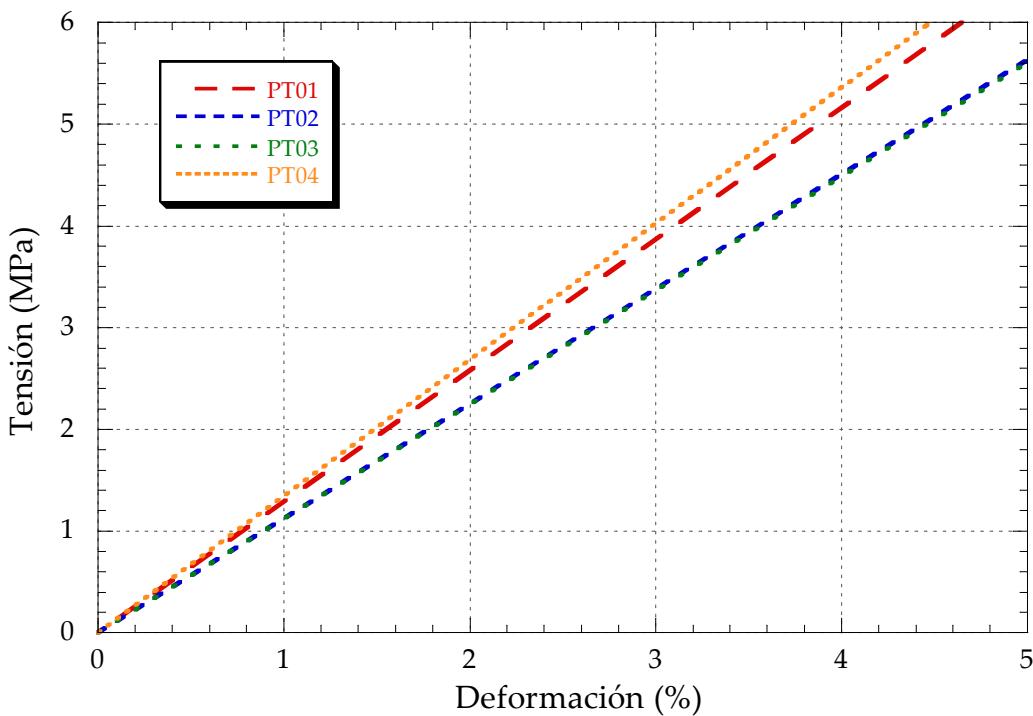


Fig. 35 Ajuste con recta de regresión lineal del tramo elástico para obtener el E_t del PT.

En la Tabla 7 se presentan las características mecánicas que se obtienen de las curvas tensión-deformación, tales como: el módulo de elasticidad (E_t), el límite elástico (σ_y), la tensión de rotura (σ_b), y la deformación bajo carga máxima (ε_m).

Tabla 7. Parámetros de resistencia a tracción de las probetas PT.

Probeta	Módulo de elasticidad (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación bajo carga máxima (%)
PT01	129,12	9,64	15,44	522,42
PT02	112,62	9,90	11,57	330,58
PT03	112,06	9,33	14,85	448,87
PT04	133,93	9,33	10,78	307,71
Media	121,93	9,55	13,16	425,62

Observando el diagrama tensión-deformación nos encontramos que el mayor incremento de carga se produce en el tramo elástico, una vez sobrepasado el límite elástico el material tiene un escalón de cedencia, donde sin aumentar la carga la probeta alcanza deformaciones de en torno a un 200% (se estira dos veces su longitud inicial), a partir de dicho valor la carga comienza a aumentar lentamente hasta provocar la rotura.

En relación con los parámetros obtenidos, el valor medio del módulo elástico es de 121,3 MPa, por lo que nos encontramos con un plástico semirrígido (E_t entre 70 y 700 MPa), esto nos indica que en el tramo elástico el incremento de carga produce deformaciones relativamente

pequeñas. En el punto de rotura tenemos un valor de tensión medio de 13,16 MPa y una deformación media de un 452,62%. Sin embargo, observando los resultados por separado, podemos apreciar como en el tramo elástico el comportamiento del material se mantiene prácticamente constante, mientras que en la zona plástica los resultados obtenidos son más heterogéneos, por lo que el comportamiento en rotura es más difícil de predecir. Por otra parte, el alto porcentaje de deformación nos indica que nos encontramos ante un material muy dúctil, esta característica se debe a que el LDPE es un polímero con una estructura en cadena ramificada. El valor de ductilidad también indica que es un polímero con una elevada tenacidad, entendiendo este parámetro como la cantidad energía que absorbe un material antes de romperse.

Por último, cabe destacar que los datos obtenidos experimentalmente se encuentran dentro del rango de valores teóricos establecidos en la Tabla 2.

Polietileno reciclado

En la Fig. 36 se muestra el comportamiento a tracción de las probetas de polietileno reciclado, mientras que en la Fig. 37 se representa el ajuste lineal de los valores de tensión que se encuentran entre el 0% y 5% de deformación, usado para obtener el módulo elástico del material.

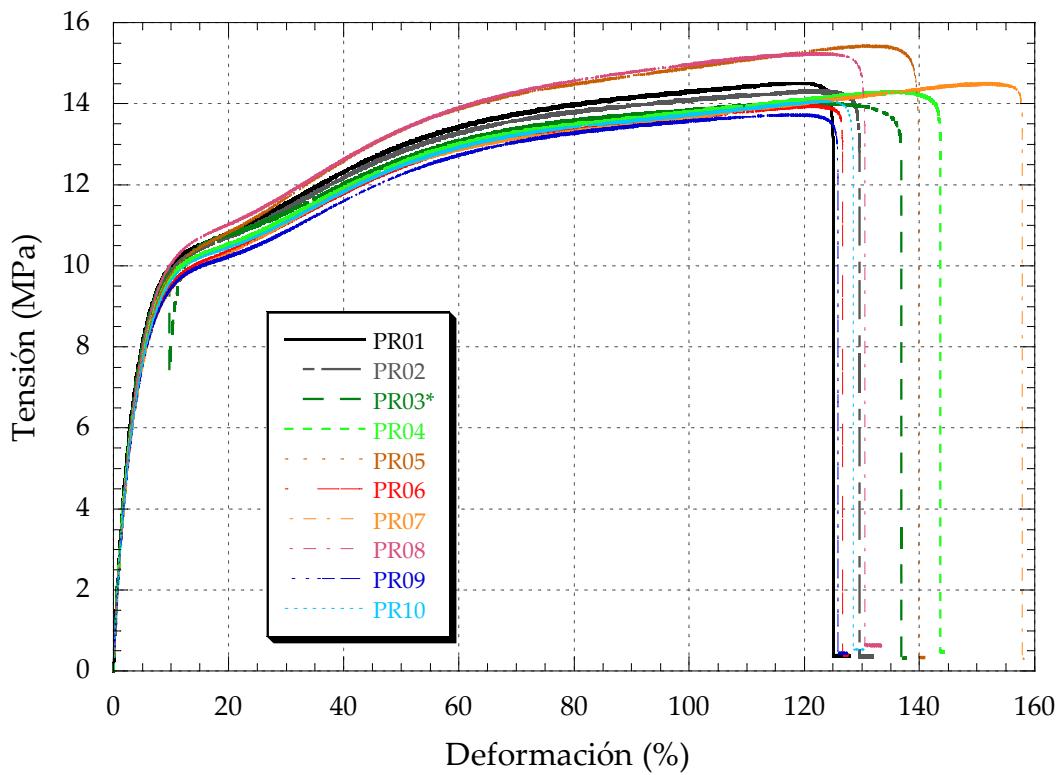


Fig. 36. Curvas tensión-deformación obtenidas en el ensayo de tracción del PR.

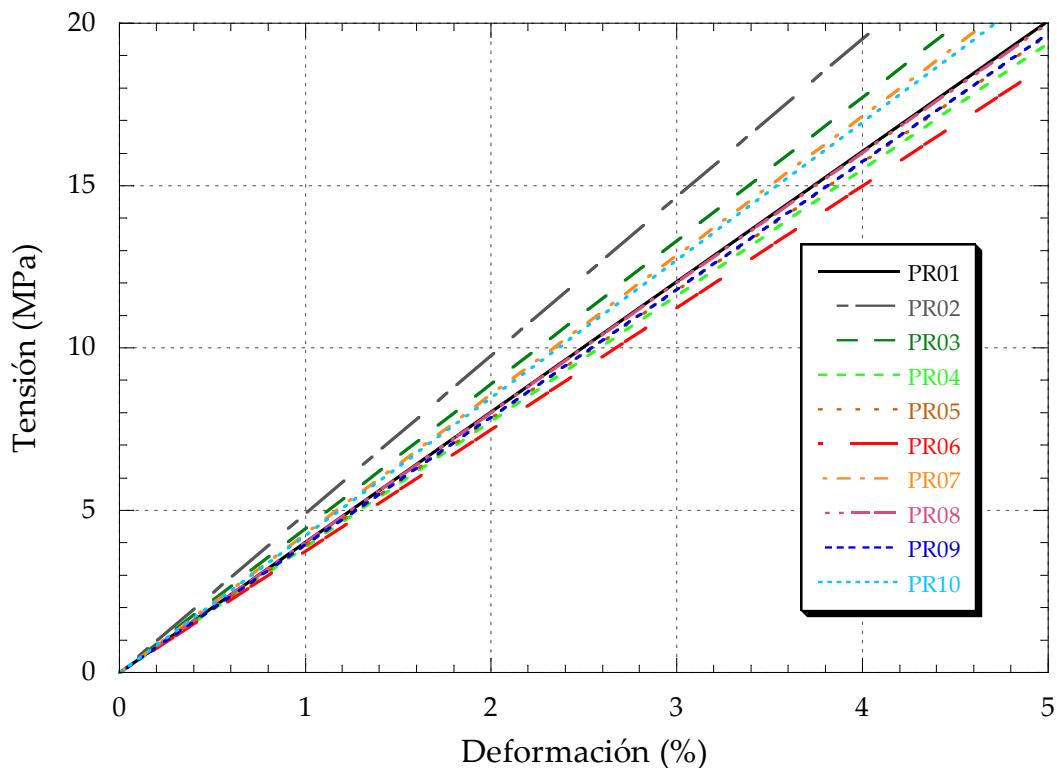


Fig. 37. Ajuste con recta de regresión lineal del tramo elástico para obtener el E_t del PR.

En la Tabla 8 se recogen los parámetros extraídos de las curvas tensión–deformación.

Tabla 8. Parámetros de resistencia a tracción de las probetas de PR.

Probeta	Módulo de elasticidad (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación bajo carga máxima (%)
PR01	199,40	10,33	14,51	136,42
PR02	203,54	-	14,03	137,41
PR03	196,12	10,11	14,30	144,14
PR04	192,07	10,27	15,45	140,94
PR05	190,59	10,69	13,97	127,53
PR06	188,19	9,87	14,52	158,19
PR07	199,72	9,78	13,75	133,37
PR08	189,41	9,91	14,07	127,38
PR09	190,96	10,22	14,33	130,38
PR10	197,95	10,39	13,90	131,91
Media	194,80	10,17	14,28	136,77

Los valores de resistencia promedios del polietileno reciclado nos arrojan un módulo elástico de 194,80 MPa, un límite elástico de 10,17 MPa y una tensión de rotura de 14,28 MPa. En cuanto a la ductilidad tenemos que la deformación bajo carga máxima es de un 136,77%.

Los resultados obtenidos de las diferentes probetas muestran una baja dispersión, por lo que el comportamiento del polietileno reciclado es prácticamente constante, esto es un indicativo de que en el proceso de conformado no ha habido problemas de homogeneización o de elevada porosidad que provoquen caídas drásticas en la resistencia del material.

Lo primero que se puede observar es que los valores tanto de resistencia a rotura como de límite elástico se incrementan un 6% y un 9% respectivamente, por lo que se puede concluir que el proceso de reciclaje no ha afectado en la resistencia del material. Sin embargo, el módulo elástico del reciclado se ha visto aumentado aproximadamente un 59%. Al mismo tiempo, la deformación bajo cargo máxima del material disminuye casi un 70%, esto también nos indica que la tenacidad del material reciclado es menor. Podemos concluir, que se ha obtenido un polietileno cuyas prestaciones no se han visto mermadas por el reciclaje y que además es más rígido, es decir, se necesita un mayor esfuerzo para conseguir deformarlo.

3.1.3 Dureza

Las medidas de dureza tomadas con las muestras de polietileno original se recogen en la Tabla 9, las realizadas con el polietileno reciclado se recopilan en la

Tabla 10.

Tabla 9. Valores de dureza Shore D del polietileno original.

Muestra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio
Muestra 1	46,0	45,0	46,5	46,0
Muestra 2	45,0	47,0	46,5	46,2
Muestra 3	48,0	47,0	46,5	47,2
Muestra 4	46,5	46,5	46,5	46,5
Muestra 5	49,0	49,0	50,0	49,3
Muestra 6	48,5	49,5	48,0	48,7
Muestra 7	49,5	48,0	48,5	48,7
Muestra 8	47,5	47,0	48,0	47,5
Muestra 9	47,5	48,0	47,0	47,5
Muestra 10	48,5	47,5	47,5	47,8

Tabla 10. Valores de dureza Shore D del polietileno reciclado.

Muestra	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio
Muestra 1	47,0	47,5	46,5	47,0
Muestra 2	48,0	48,0	46,5	47,5
Muestra 3	46,5	44,5	45,5	45,5
Muestra 4	48,5	48,0	47,0	47,8
Muestra 5	46,0	46,5	46,5	46,3
Muestra 6	47,0	47,5	46,5	47,0
Muestra 7	47,5	47,0	46,5	47,0
Muestra 8	46,5	45,5	46,0	46,0
Muestra 9	47,0	46,0	46,5	46,5
Muestra 10	49,0	49,0	48,0	48,7

La dureza Shore media del polietileno original es de 47,54, siendo de 46,90 para el polietileno reciclado, en términos de dureza Shore D, estos valores indican que tenemos un polímero que se puede considerar duro. En vista de los resultados, podemos concluir que la dureza del material no se ve afectada por el reciclado. Por otro lado, si bien la dureza en los polímeros no puede ser relacionada directamente con la resistencia a tracción (como si ocurre en los aceros), si nos da una idea de que la resistencia del polietileno reciclado debe ser parecida que la del original, tal como se demuestra en apartados anteriores.

3.2 Caracterización de las fibras de polietileno

3.2.1 Propiedades geométricas

En la Fig. 38 se representa la distribución normal de los diámetros tomados de 100 fibras.

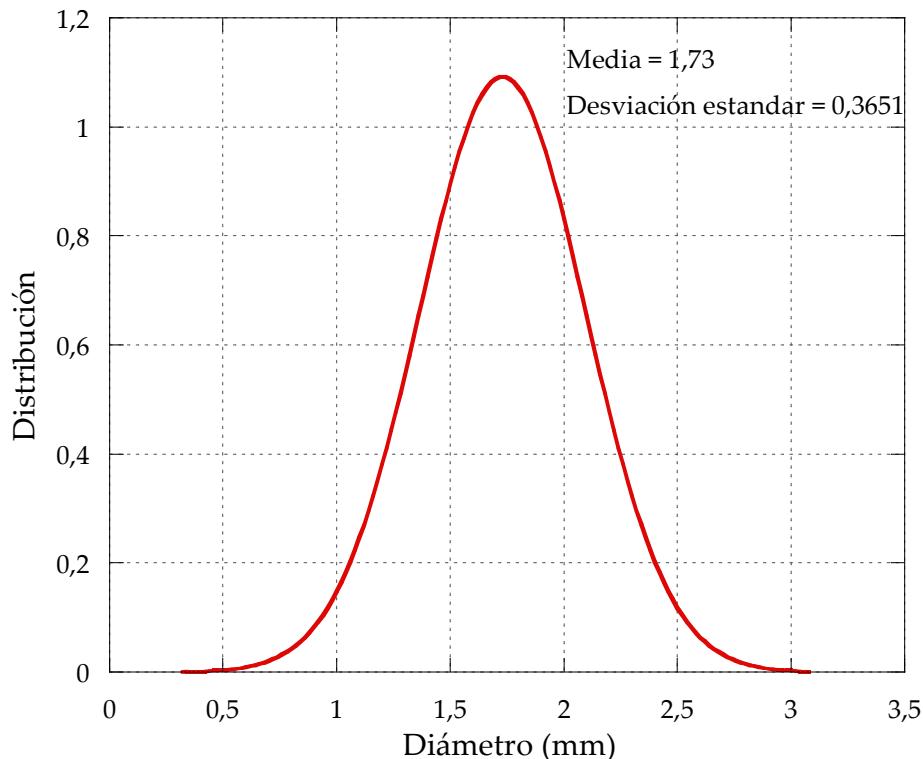


Fig. 38. Distribución normal de los diámetros de las fibras.

El diámetro medio de las fibras es de 1,73 mm, observando la distribución se aprecia que la gran parte de las fibras se encuentran en el intervalo de 1,4 a 2 mm de diámetro. La desviación estándar de 0,3651 mm nos indica que la dispersión de los datos es pequeña y que se encuentran próximos a la media. Podemos concluir que las fibras obtenidas tienen un grosor bastante mayor que las fibras que se encuentran actualmente en el mercado, tomando como referencia la Tabla 1.

3.2.2 Rugosidad superficial

En la Fig. 39 se muestra el perfil de alturas de una fibra de polietileno. Los resultados de rugosidad media obtenidos se presentan en la Tabla 11.

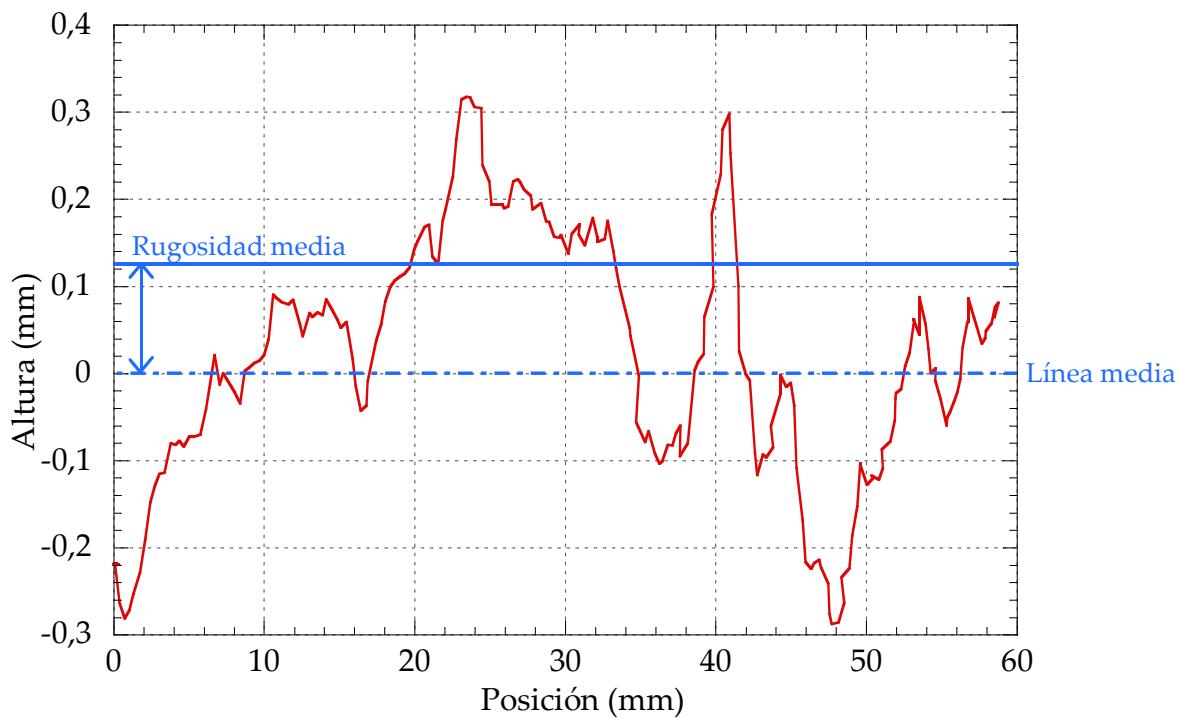


Fig. 39. Perfil de alturas de una fibra de polietileno.

Tabla 11. Parámetros de rugosidad media de las fibras.

Muestra	Longitud de evaluación (mm)	Rugosidad media (mm)
Muestra 1	58,10	0,1248
Muestra 2	58,79	0,1774
Muestra 3	55,27	0,0641
Muestra 4	63,91	0,0898
Muestra 5	59,86	0,1169
Muestra 6	58,97	0,1601
Muestra 7	59,56	0,0689
Muestra 8	61,08	0,1105
Muestra 9	58,60	0,1472
Muestra 10	60,24	0,1130
Media	59,44	0,1173

La rugosidad media de las fibras es de 0,1173 mm y su desviación estándar es de 0,0352 mm, esto indica que el conjunto de datos obtenido es homogéneo. En este caso conseguir fibras con una alta rugosidad, como se muestra en la Fig. 40, es beneficioso para su aplicación en

hormigones debido a que se aumenta la fricción entre ambos materiales, lo que favorece la adherencia de las fibras con la matriz de hormigón, y por consiguiente se mejora la capacidad que tienen las fibras de reforzar el hormigón.



Fig. 40. Detalle de la rugosidad de la fibra.

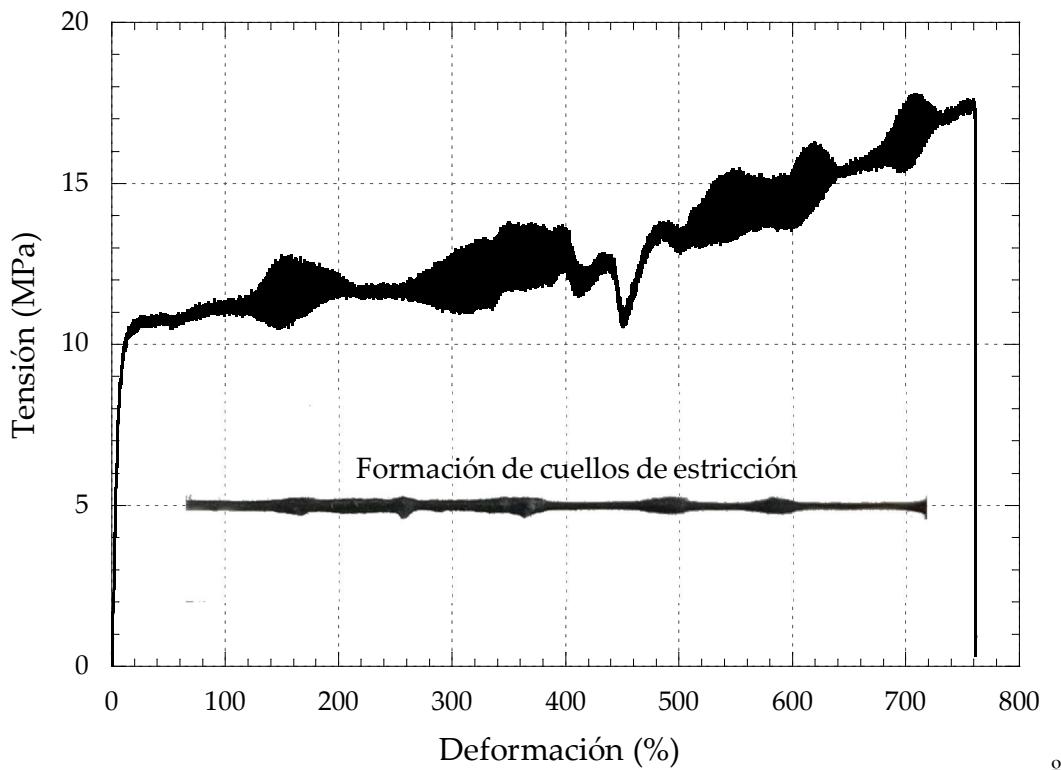
Como se muestra en la Tabla 12, las fibras fabricadas pueden considerarse como largas, gruesas e irregulares. Según la norma UNE-EN 14889-2 estas fibras se clasifican como macrofibras de clase II y pueden tener una función estructural.

Tabla 12. Resumen propiedades geométricas de las fibras.

Material	Diámetro medio (mm)	Longitud media (mm)	Densidad (g/cm ³)	Rugosidad media (mm)
Polietileno reciclado	58,10	60	0,92	0,1173

3.2.3 Resistencia a tracción

Los diagramas tensión-deformación de las fibras tienen de manera general la forma mostrada en la Fig. 41.

*Fig. 41. Curva tensión-deformación genérica de las fibras.*

Los resultados del ensayo de tracción de las fibras se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados ensayo tracción fibra

Muestra	Módulo de elasticidad (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación bajo carga máxima (%)
Muestra 1	171,04	9,22	21,28	733,50
Muestra 2	194,87	9,93	15,81	677,10
Muestra 3	211,40	10,55	23,83	755,66
Muestra 4	162,44	8,28	15,60	392,95
Muestra 5	215,95	12,23	27,07	553,65
Muestra 6	144,88	10,21	17,59	646,85
Muestra 7	110,73	11,06	16,15	408,06
Muestra 8	181,73	11,79	23,92	636,52
Muestra 9	138,40	8,94	17,02	564,23
Muestra 10	156,98	10,42	18,28	634,76
Muestra 11	86,97	7,06	11,62	396,72
Muestra 12	124,28	9,08	19,61	636,78
Muestra 13	152,23	9,29	16,33	569,52

Muestra	Módulo de elasticidad (MPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación bajo carga máxima (%)
Muestra 14	120,13	10,73	15,77	592,44
Muestra 15	136,76	8,94	9,43	201,51
Muestra 16	140,41	10,43	13,46	679,09
Muestra 17	140,08	10,64	17,76	707,80
Muestra 18	192,65	10,90	14,98	479,09
Muestra 19	131,86	12,19	18,35	573,05
Muestra 20	175,26	9,52	14,81	419,39
Muestra 21	68,97	8,22	15,33	533,50
Muestra 22	175,78	10,45	11,37	128,46
Muestra 23	57,56	9,13	15,61	801,00
Muestra 24	77,22	11,08	21,31	853,90
Muestra 25	108,65	10,43	18,64	869,02
Media	148,09	10,03	17,24	577,78

Analizando la curva de tensión-deformación se observa un comportamiento del material muy diferenciado entre el tramo elástico y el tramo plástico. En la zona elástica tenemos un material relativamente rígido, es decir, para conseguir deformarlo se necesita aplicar una carga elevada. Sin embargo, una vez que se sobrepasa el límite elástico, la fibra se comporta como un material muy dúctil, con bajos incrementos de carga se consiguen grandes deformaciones.

En relación con los resultados, se ha obtenido un módulo de elasticidad de 148,09 MPa, lo que supone un incremento de un 22% respecto del polietileno original. El límite elástico es de 10,03 MPa, comparándolo con el original observamos que es una característica que se mantiene constante. La resistencia a tracción obtenida es de 17,24 MPa, siendo una mejora de un 31%. En cuanto a la deformación bajo carga máxima obtenemos un valor de 577,78%, respecto al material original el incremento es de aproximadamente un 36%, este aumento también nos indica que la energía que se necesitará para romper la fibra es mayor, lo que supone un aumento de la tenacidad del material.

Una vez analizados todos los datos podemos concluir que las fibras obtenidas mejoran sus propiedades mecánicas respecto al polietileno original, por lo tanto, la metodología seguida en este trabajo para el reciclaje y fabricación de las fibras resulta óptima para la aplicación a la que van dirigidas.

3.2.4 Comparativa entre polietileno original, probetas recicladas y fibras

A continuación, se va a comparar el comportamiento mecánico de los tres productos de polietileno ensayados, con el objetivo de observar si las diferencias en el proceso de fabricación de las probetas de polietileno y las fibras suponen un cambio en las características mecánicas del material.

Lo primero que podemos observar en todas las gráficas es la gran dispersión de resultados que muestran las fibras respecto a los otros dos productos. Este fenómeno se debe a que mientras la caracterización del polietileno original y el reciclado se realizaron con probetas normalizadas, las fibras son fabricadas de manera manual, lo que conlleva que la sección a lo largo de la fibra sea variable dificultando la medida del área inicial de cada muestra.

En la Fig. 42 se puede observar como el módulo elástico del PR y de las fibras se ve incrementado respecto al PT. En cuanto al límite elástico y a la tensión de rotura, pese a que los valores medios tanto del PR como de las fibras muestran un ligero incremento, las nubes de puntos de los tres productos mostradas en las Fig. 43 y Fig. 44 nos indican que el proceso de reciclado no altera en gran medida dichas propiedades.

La mayor diferencia la encontramos en la deformación bajo carga máxima, mostrada en la Fig. 45. En el caso de las fibras si bien el valor medio es mayor que el del PT, las nubes de puntos indican que la ductilidad de ambos es similar. Sin embargo, los valores de deformación del PR son muy inferiores a los otros dos, por un lado, esta reducción de ductilidad se puede explicar debido al aumento de rigidez que muestra el material, por otro lado, puede deberse a las diferencias en las relaciones de aspecto que hay entre las muestras utilizadas, al tener la probeta PR una relación de aspecto mayor al resto se dificulta la deformabilidad e la misma, mientras que las fibras tienen una relación de aspecto menor y por lo tanto tiene más facilidad para deformarse.

A raíz de lo analizado en este apartado podemos concluir que en lo referido a resistencia a tracción los tres productos son muy similares, pudiéndose considerar que son el mismo material, esto nos indica que el proceso de reciclaje no ha producido ninguna degradación en el polietileno original.

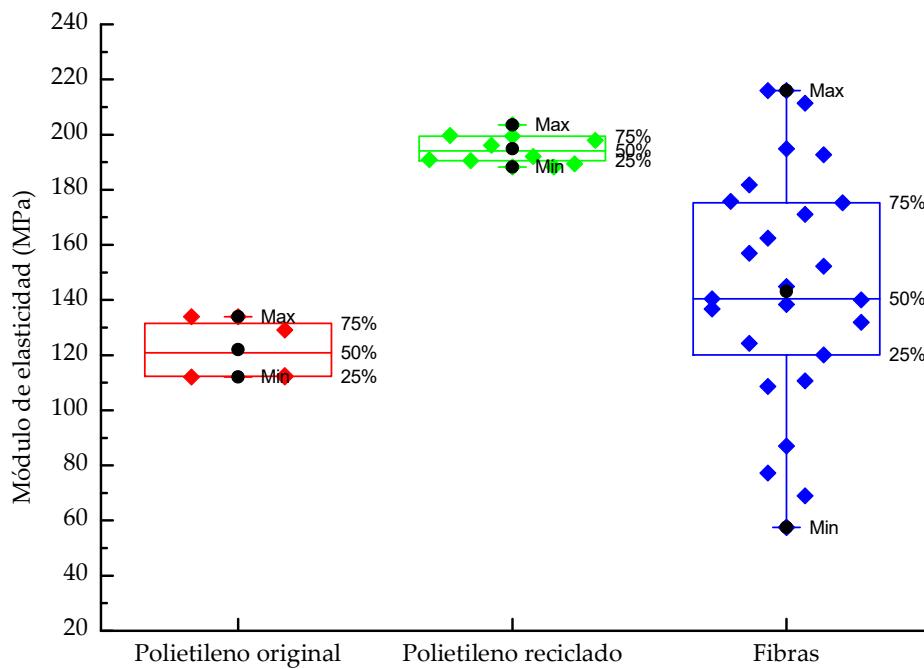


Fig. 42. Comparativa del módulo elástico entre PT, PR y fibras.

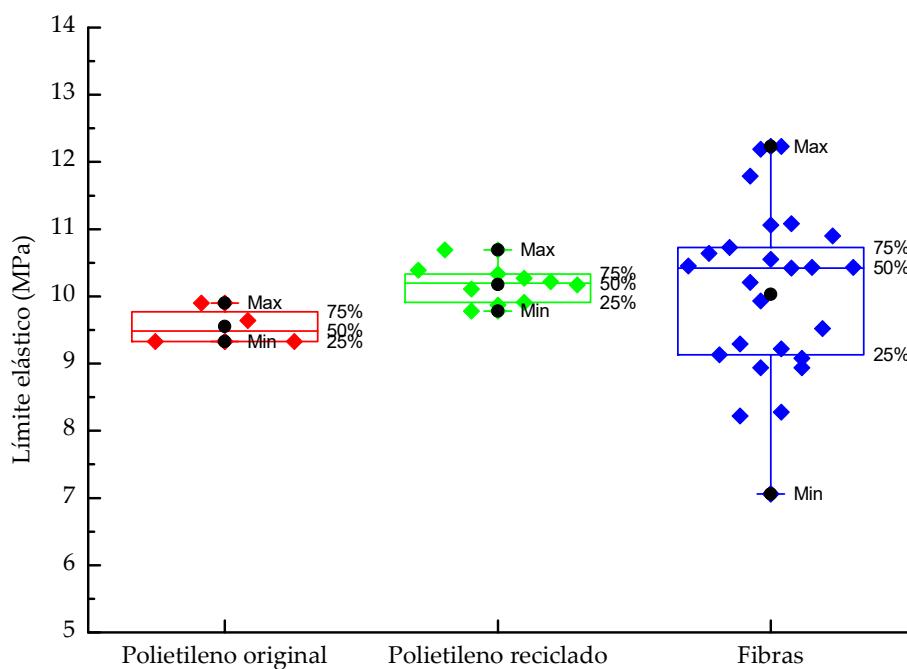
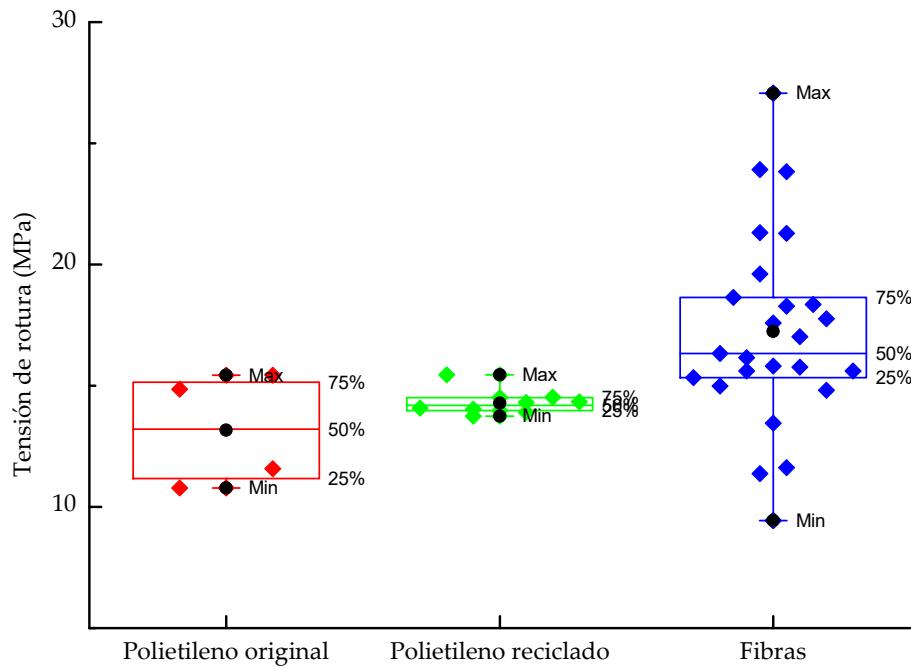
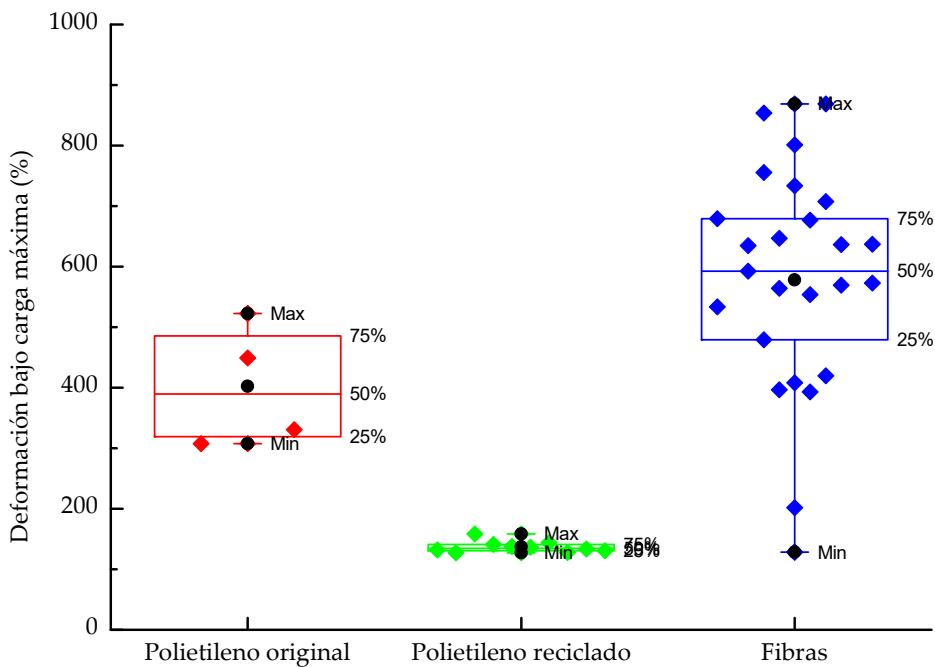


Fig. 43. Comparativa del límite elástico entre PT, PR y fibras.

*Fig. 44. Comparativa de la tensión de rotura entre PT, PR y fibras.**Fig. 45. Comparativa de la deformación bajo carga máxima entre PT, PR y fibras.*

3.3 Hormigón estructural

3.3.1 Consistencia del hormigón fresco

La consistencia es la capacidad que presenta el hormigón para deformarse y moldearse en estado fresco. Como podemos ver en la Tabla 14 la altura del cono de Abrams del hormigón fabricado se encuentra por encima de 22 cm, este valor de asentamiento se corresponde con

una consistencia de tipo líquida, de acuerdo con la EHE-08. Este tipo de hormigón tiene un serie de prestaciones específicas como: una mayor facilidad de colocación en lugares de difícil acceso, un requerimiento de vibración menor para su compactación o que permite su colocación en obra mediante técnicas de bombeo o proyección.

Por otro lado, se puede concluir que la inclusión de 2kg/m³ y 4kg/m³ de fibras no afecta a la trabajabilidad del hormigón.

Tabla 14. Valores de asiento del cono de Abrams.

Amasada	Cono (cm)
Sin Fibras	24
Con Fibras (2kg/m ³)	23
Con Fibras (4kg/m ³)	23

3.3.2 Propiedades físicas

3.3.2.1 Densidad aparente, densidad relativa, porosidad accesible y coeficiente de absorción.

Los resultados de los ensayos de propiedades físicas se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Propiedades físicas del hormigón endurecido.

Probetas	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad relativa (g/cm ³)	Absorción (%)	Porosidad (%)
HFC	2,20	2,33	2,52	5,55
HRFP-2	2,18	2,28	2,00	4,35
HRFP-4	2,26	2,36	1,91	4,31

En cuanto a la densidad del hormigón podemos observar que no hay una clara diferencia entre el hormigón de control y el hormigón con fibras, además, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de densidades (2-2,6 g/cm³) establecido para hormigones normales según la EHE-8.

Sin embargo, la inclusión de 2 kg/m³ y 4kg/m³ de fibras reducen la absorción en un 21% y un 24% respectivamente. De igual manera, la porosidad del hormigón con fibras se reduce en ambos casos un 22% respecto al hormigón de control. En la Fig. 46 y en la Fig. 47 se observa como las propiedades de porosidad y absorción se pueden ajustar a una curva exponencial con respecto al volumen de fibras que contiene el hormigón, de manera que la incorporación de fibras tenderá a reducir dichas propiedades, teniendo siempre en cuenta que son curvas teóricas y que existirá un límite de volumen de fibras con la que dicha disminución no se lleve a cabo.

Relacionando la porosidad y la densidad del HRC y el HRFP-4, podemos deducir que, así como la pasta rellena los huecos en el hormigón, las fibras rellenan los huecos entre los áridos, por lo tanto, la reducción de porosidad conlleva una reducción del número de huecos, esto conlleva un ligero aumento de la masa (hormigón + fibras) para un mismo volumen de probeta, lo que se explicaría el ligero aumento que sufre la densidad aparente del HRFP-4. En el caso del HRFP-2, aunque también existe una disminución de la porosidad, la densidad aparente es prácticamente igual a la del HRC, este efecto puede deberse al hecho de que la fibra de polietileno tiene una densidad menor a la del hormigón.

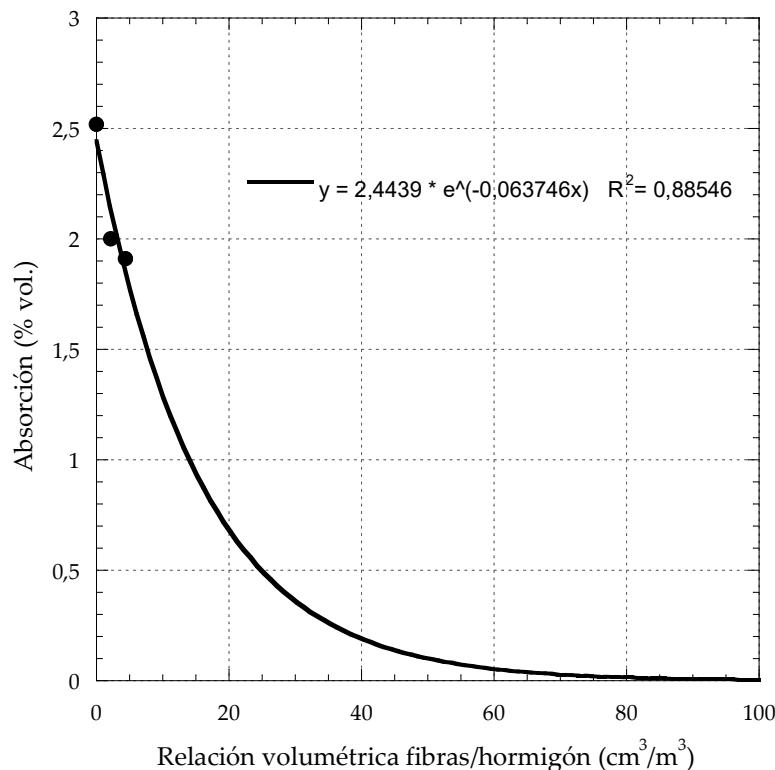


Fig. 46. Relación entre la absorción y el volumen de fibras del hormigón.

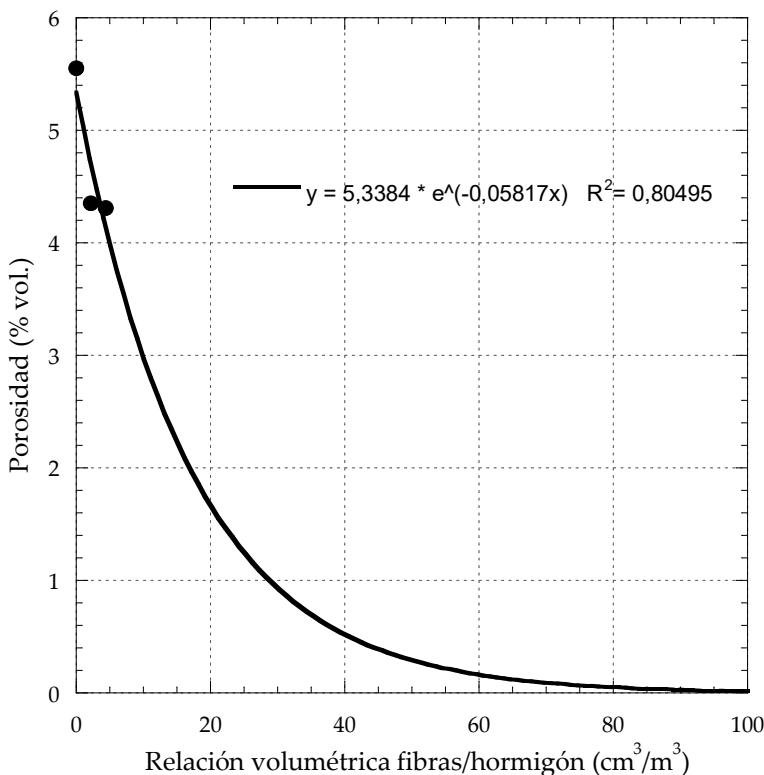


Fig. 47. Relación entre la porosidad y el volumen de fibras del hormigón.

3.3.2.2 Determinación del coeficiente de permeabilidad al oxígeno

En la Tabla 16 se pueden ver los resultados de permeabilidad al oxígeno para cada tipo de hormigón. En comparación con los valores de referencia expuestos en la Tabla 4 podemos concluir que los tres hormigones fabricados tienen una baja permeabilidad. Por otro lado, el incremento del volumen de fibras aumenta ligeramente la permeabilidad del hormigón al oxígeno, esto puede deberse a que, si bien las fibras reducen la porosidad del hormigón, el propio material de las fibras es permeable al oxígeno, facilitando que el éste traspase el hormigón.

Tabla 16. Coeficiente de permeabilidad al oxígeno.

Probetas	Permeabilidad al oxígeno (m ²)
HFC	4,33E-18
HRFP-2	6,32E-18
HRFP-4	6,74E-18

3.3.2.3 Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión

En la Tabla 17 se muestran los resultados de permeabilidad al agua. La EHE-08 exige una penetración máxima del agua de 50 mm, como las huellas obtenidas en el HFC y HRFP-2 son mayores, se puede concluir que son hormigones bastante permeables al agua y por tanto se

encuentran expuestos en mayor medida a potenciales agresiones. La elevada permeabilidad que muestran es debida, entre otros factores, a una alta relación agua/cemento, establecida en 0,60. Sin embargo, el resultado mostrado en el HRFP-4 se encuentra en el límite de lo establecido en la norma, se puede considerar que es un hormigón lo suficientemente impermeable como para ser usado en ambientes agresivos.

Por otro lado, se observa que la permeabilidad al agua disminuye con la incorporación de fibras, siendo de un 5,24% para el hormigón con 2kg/m³ de fibras y de un 14,45% para el de 4kg/m³. Esta propiedad se debe al hecho de que el aumento de la cantidad de fibras reduce el porcentaje de huecos del hormigón.

Tabla 17. Permeabilidad al agua bajo presión.

Probetas	Permeabilidad al agua bajo presión (mm)
HFC	58,83
HRFP-2	55,75
HRFP-4	50,33

3.3.3 Propiedades mecánicas

3.3.3.1 Resistencia a compresión uniaxial

Los resultados de los ensayos a compresión se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Resistencia a compresión.

Probetas	Edad (días)	Resistencia compresión (MPa)
HFC	7	26,01
	28	27,16
HRFP-2	7	27,52
	28	28,84
HRFP-4	7	28,17
	28	28,87

A la vista de los valores obtenidos se puede concluir que añadir fibras a la mezcla, en las proporciones ensayadas, produce un ligero aumento en la resistencia a compresión del hormigón, esta mejora puede deberse a que la adición de fibras reduce la porosidad del hormigón, obteniendo un material más compacto y por lo tanto más resistente. Las resistencias de los tres hormigones a los siete días son superiores a los 16,5 MPa exigidos para el CEM III utilizado en la dosificación.

3.3.3.2 Resistencia a tracción indirecta

En la Tabla 19 aparecen los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta.

Tabla 19. Resistencia a tracción indirecta.

Probetas	Edad (días)	Resistencia tracción (MPa)
HFC	7	2,02
	28	2,07
HRFP-2	7	2,99
	28	2,20
HRFP-4	7	2,78
	28	2,83

Se puede observar que el valor del HRFP-2 a 7 días va un valor anómalo, debido posiblemente a un error en la ejecución del ensayo, para analizar la resistencia a tracción se van a tener en cuenta los valores obtenidos a 28 días.

La resistencia a tracción de todos los hormigones reforzados con fibras fue mayor que la de control. En el caso del HRFP-2 se aumentó la resistencia a tracción un 6,28%, mientras que para el HRFP-4 el incremento fue de 36,71%. Podemos concluir que existe una correlación entre un mayor volumen de fibras y un aumento de la resistencia a tracción.

En relación con la fractura a tracción de los cilindros se puede apreciar un cambio en el modo de fallo cuando se agregan las fibras de polietileno. Mientras que los especímenes de control rompieron de manera abrupta, típico de la rotura frágil del hormigón, las probetas con fibras mostraron una fractura suave, manteniendo la forma original de la misma. Como se aprecia en la Fig. 48 las fibras son las encargadas de sujetar la probeta una vez se produce la grieta. Se puede concluir que la incorporación de las fibras disminuye la rotura frágil del hormigón ayudando además a controlar las grietas.



Fig. 48. Resultado de la probeta sometida al ensayo tracción indirecta (izq.) y probeta partida por la mitad posteriormente para comprobar la adherencia de las fibras (dcha.)

En la Fig. 49 se muestra una probeta cortada donde se puede apreciar la distribución de las fibras en el hormigón, si bien la cantidad de fibras usada no es muy elevada se observa que se distribuyen aleatoriamente por toda la superficie. Esto nos indica que las fibras de polietileno se mezclan sin problema con el hormigón, sin producirse bolas o erizos. Además, se puede comprobar como la adherencia de las fibras es buena, debido entre otros factores, a la rugosidad de estas. También hay que tener en cuenta que la dirección de las fibras es aleatoria, esto juega un papel fundamental es la resistencia a tracción del hormigón ya que las fibras que se encuentren en el eje longitudinal a la probeta no aportarán refuerzo, a modo de ejemplo en la Fig. 50 se muestra la probeta cilíndrica que mejor resistencia a tracción mostró de todos los ensayos.



Fig. 49. Distribución de las fibras en la probeta cilíndrica.



Fig. 50. Ejemplo de la dirección en las que se disponen las fibras.

4. Conclusiones

Con el objetivo de promover la sostenibilidad en la construcción, el presente trabajo se ha centrado en ofrecer una aplicación a los residuos de polietileno industrial, reciclando en forma de fibras y utilizándolo como refuerzo en hormigón, para posteriormente realizar un análisis de sus propiedades mecánicas. A continuación, se exponen las conclusiones a las que se han llegado tras el análisis de los resultados obtenidos.

- La metodología seguida para el reciclaje de las fibras no afecta negativamente al comportamiento mecánico de las mismas, de hecho, se consigue un material ligeramente superior al original.
- Las fibras obtenidas mediante inyección tienen una superficie muy rugosa, lo que mejora la adherencia con el hormigón.
- La inclusión de fibras en la mezcla, en las proporciones estudiadas, producen un ligero aumento en la resistencia a compresión del hormigón. Característica que está muy relacionada con el hecho de que la porosidad del hormigón se vea reducida un 22%.
- La resistencia a tracción es una de las principales ventajas del uso de hormigón reforzado con fibras de polietileno con respecto al hormigón de control, ya que con 4 kg/m³ de fibras se consigue aumentar un 36,70% la resistencia.
- La incorporación de fibras reduce la permeabilidad al agua del hormigón, siendo la disminución más notable de un 14,45% para el HRFP-4. Además, se consigue un hormigón que puede ser aplicable en ambientes agresivos de acuerdo con la EHE-08.
- Las fibras de polietileno también demuestran una excelente capacidad para el control de las fisuras del hormigón, evitando además la rotura frágil del material.
- Sería necesario un estudio más exhaustivo con respecto a la durabilidad del hormigón con fibras de polietileno, así como un análisis de la resistencia de las fibras en un medio alcalino.
- Sería preciso fabricar hormigones con mayores porcentajes de fibras, para analizar si el aumento de ellas conlleva una mejora del comportamiento a tracción del hormigón.

Los resultados experimentales confirman la hipótesis inicial sobre el potencial de las fibras de polietileno reciclado para estructuras de hormigón reforzado.

5. Bibliografía

- [1] PlasticsEurope, Plásticos – Situación en 2018, (2018).
- [2] L. Gu, T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: A critical review, *Waste Manag.* 51 (2016) 19–42. doi:10.1016/J.WASMAN.2016.03.005.
- [3] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.* 3 (2017) 19–24. doi:10.1126/sciadv.1700782.
- [4] N. Singh, R. Singh, I.P.S. Ahuja, Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications, *Compos. Part B Eng.* 115 (2017) 409–422. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2016.09.013.
- [5] PlasticsEurope, The facts 2018, PlasticsEurope. (2018). doi:10.1016/j.marpolbul.2013.01.015.
- [6] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.* 3 (2017) e1700782. doi:10.1126/sciadv.1700782.
- [7] R. Tuladhar, S. Yin, Sustainability of using recycled plastic fiber in concrete, Elsevier Ltd, 2019. doi:10.1016/b978-0-08-102676-2.00021-9.
- [8] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.* 3 (2017) 19–24. doi:10.1126/sciadv.1700782.
- [9] M. Eriksen, L.C.M. Lebreton, H.S. Carson, M. Thiel, C.J. Moore, J.C. Borerro, F. Galgani, P.G. Ryan, J. Reisser, Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea, *PLoS One.* 9 (2014) e111913. doi:10.1371/journal.pone.0111913.
- [10] L. Lebreton, B. Slat, F. Ferrari, B. Sainte-Rose, J. Aitken, R. Marthouse, S. Hajbane, S. Cunsolo, A. Schwarz, A. Levivier, K. Noble, P. Debeljak, H. Maral, R. Schoeneich-Agent, R. Brambini, J. Reisser, Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic, *Sci. Rep.* 8 (2018) 1–15. doi:10.1038/s41598-018-22939-w.
- [11] A.L. Andrade, Microplastics in the marine environment, *Mar. Pollut. Bull.* 62 (2011) 1596–1605. doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2011.05.030.
- [12] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, T.S. Galloway, Microplastics as contaminants in the marine environment: A review, *Mar. Pollut. Bull.* 62 (2011) 2588–2597. doi:10.1016/J.MARPOLBUL.2011.09.025.
- [13] M.A. Browne, Plastic world, *Dairy Ind. Int.* 70 (2005) 33–35.
- [14] Y. Shi, Development of recycled polypropylene plastic fibres to reinforce concrete, (2015) 185. <http://researchonline.jcu.edu.au/43810/> AResearchOnline@jcu.edu.au.
- [15] I.A. Ignatyev, W. Thielemans, B. Vander Beke, Recycling of polymers: A review, *ChemSusChem.* 7 (2014) 1579–1593. doi:10.1002/cssc.201300898.
- [16] K. Hamad, M. Kaseem, F. Deri, Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works, *Polym. Degrad. Stab.* 98 (2013) 2801–2812.

doi:10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2013.09.025.

- [17] S. Mindess, J.F. Young, D. Darwin, *Concrete*, 2nd ed., Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, 2003.
- [18] P. Jimenez Montoya, Á. García Meseguer, F. Morán Cabré, *Hormigón armado*, (2000).
- [19] P. Tamayo, *Diseño Y Caracterización De Un Hormigón De Alta Densidad Para Protección Radiológica Utilizando Magnetita*, (2017).
- [20] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI), Report on Fiber Reinforced Concrete, Rep. Reinf. Concr. (Reapproved). ACI Comm. 544. Detroit,. 96 (2009) 1–66. <http://indiafiber.com/Files/ACI report.pdf>.
- [21] A. Bentur, S. Mindess, *Synthetic fibres, Fibre Reinf. Cem. Compos.* (2007) 60.
- [22] U.-E. UNE-EN 14889-2, *Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad*, (2008).
- [23] A.R.R. R. SETHUNARAYANAN, S. CHOICKALINGAM, *Natural Fiber Reinforced Concrete Fiber Reinforced Concrete Fiber Reinforced Concrete*, (2007) 57–60. doi:doi=10.1.1.522.5083&rep=rep1&type=pdf.
- [24] I. Markovic, *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete: Development and Utilisation*, 2006.
- [25] Tecnología de los Plásticos, <Https://Tecnologiadelosplasticos.Blogspot.Com/2012/08/Fibras-Polimericas.Html>. (2012).
- [26] J. Ding, G. Wu, M. Wang, L. Chen, ICCTP 2010: *Integrated Transportation Systems—Green•Intelligent•Reliable* © 2010 ASCE 3046, (2010) 3046–3054.
- [27] H. Bolat, O. Şimşek, M. Çullu, G. Durmuş, Ö. Can, *The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete*, *Compos. Part B Eng.* 61 (2014) 191–198. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2014.01.043.
- [28] D. Foti, *Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers*, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1906–1915. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.11.066.
- [29] F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, G. Rizzano, L. Feo, L. Incarnato, *Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete*, *Compos. Struct.* 93 (2011) 2368–2374. doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2011.03.025.
- [30] F. Fraternali, S. Spadea, V.P. Berardi, *Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes*, *Constr. Build. Mater.* 61 (2014) 293–302. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.03.019.
- [31] F. Pelisser, O.R.K. Montedo, P.J.P. Gleize, H.R. Roman, *Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete*, *Mater. Res.* 15 (2012) 679–686. doi:10.1590/S1516-14392012005000088.
- [32] R.P. Borg, O. Baldacchino, L. Ferrara, *Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete*, *Constr. Build. Mater.* 108

- (2016) 29–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029.
- [33] E.L. Pereira, A.L. de Oliveira Junior, A.G. Fineza, Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete, *Constr. Build. Mater.* 149 (2017) 837–848. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.05.148.
- [34] N.K. Bui, T. Satomi, H. Takahashi, Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study, *Waste Manag.* 78 (2018) 79–93. doi:10.1016/J.WASMAN.2018.05.035.
- [35] A. Meza, S. Siddique, Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber, *Constr. Build. Mater.* 213 (2019) 286–291. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.081.
- [36] W.H. Kwan, M. Ramlı, C.B. Cheah, Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment, *Constr. Build. Mater.* 63 (2014) 62–71. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.04.004.
- [37] V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites, *Constr. Build. Mater.* 107 (2016) 321–331. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.01.024.
- [38] R. Rostami, M. Zarrebini, M. Mandegari, K. Sanginabadi, D. Mostofinejad, S.M. Abtahi, The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties, *Cem. Concr. Compos.* 97 (2019) 118–124. doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.12.012.
- [39] A.R. Kurup, K.S. Kumar, Novel Fibrous Concrete Mixture Made from Recycled PVC Fibers from Electronic Waste, *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste.* 21 (2016) 04016020. doi:10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000338.
- [40] A.R. Kurup, K. Senthil Kumar, Effect of Recycled PVC Fibers from Electronic Waste and Silica Powder on Shear Strength of Concrete, *J. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste.* 21 (2017) 06017001. doi:10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000354.
- [41] S. Arunima, International Journal of Advance Engineering and Research Development PARAMETRIC STUDY ON FIBROUS CONCRETE MIXTURE MADE FROM E-WASTE PVC FIBRES, (2017) 149–158.
- [42] I. Gull, M.M.B. subramanian, A New Paradigm on Experimental Investigation of Concrete for E- Plastic Waste Management, *Int. J. Eng. Trends Technol.* 10 (2014) 180–186. doi:10.14445/22315381/ijett-v10p234.
- [43] M. Chaudhary, V. Srivastava, V.C. Agarwal, Effect of Waste Low Density Polyethylene on Mechanical Properties of Concrete, 3 (2014).
- [44] A. Turlanbekov, A.B.M.A. Kaish, Early Strength Properties of Concrete Incorporating Plastic Fibers Derived from Waste Plastic Bags, *Lect. Notes Civ. Eng.* 9 (2019) 417–422. doi:10.1007/978-981-10-8016-6_33.
- [45] A. Abdulwahhab, J. Alkraidi, R. Abd, A.-R. Ghani, L. Abdalabbas, H. Kadhim, L. Abdulrasool, M. Alasadi, Mechanical Properties of High-Density Polyethylene Fiber

Concrete, Int. J. Civ. Eng. Technol. 9 (2018) 334–339.

- [46] N. Pešić, S. Živanović, R. Garcia, P. Papastergiou, Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres, Constr. Build. Mater. 115 (2016) 362–370. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050.
- [47] J.A.A.S. Filho, D. Lavorato, A. V Bergami, J.R. Azeredo, Gcec 2017, Springer Singapore, 2019. doi:10.1007/978-981-10-8016-6.
- [48] PROSPECTOR, Polyethylene (PE) Typical Properties Generic LDPE, (n.d.). <https://plastics.ulprospector.com/generics/27/c/t/polyethylene-pe-properties-processing/sp/12> (accessed July 11, 2019).
- [49] U.-E. UNE-EN ISO 1183-1, Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Método de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración., (2013).
- [50] B. M, M. A, Estructura Y Propiedades De Los Polímeros, (2011) 1–54.
- [51] U.-E. UNE-EN ISO 527-1, Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales., (2012).
- [52] U.-E. UNE-EN ISO 527-3, Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas., (2019).
- [53] U.-E. UNE-EN ISO 527-2, Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión., (2012).
- [54] U.-E. UNE-EN ISO 868, Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (dureza Shore)., (2003).
- [55] U.-E. UNE-EN ISO 4287, Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial., (1999).
- [56] U.-E. UNE-EN 12350-2, Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento., (2009).
- [57] C.T. García, HORMIGÓN RECICLADO DE APLICACIÓN ESTRUCTURAL DURABILIDAD EN AMBIENTE MARINO Y COMPORTAMIENTO A FATIGA, 2012.
- [58] U.-E. UNE-EN 12390-7, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido., (2009).
- [59] U.-E. UNE-83966, Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad., (2008).
- [60] U.-E. UNE-83981, Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido., (2008).
- [61] L. Ebensperger, R. Torrent, Medición “in situ” de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo, Rev. Ing. Construcción. 25 (2010) 371–382. doi:10.4067/s0718-50732010000300003.

- [62] U.-E. UNE-EN 12390-8, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración al agua bajo presión., (2009).
- [63] U.-E. UNE-EN 12390-3, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas., (2009).
- [64] U.-E. UNE-EN 12390-6, Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas., (2010).