

# 1 INTRODUCCIÓN



## 1.1 Uso de fibras en el campo de la Ingeniería Civil

En el campo de la ingeniería civil, la búsqueda permanente de mejorar las características de los materiales con la aplicación de distintos tipos de fibras data de épocas remotas. En el antiguo Egipto se incluía paja en la argamasa de los adobes para mejorar sus características, sobre todo en la manipulación después de su cocción al sol. Estos elementos ya se emplearon hace más de 3500 años, en la importante ciudad babilónica Aqar Quf construida en el S. XIV a.C.

Espinosa, en su Manual de Construcciones de Albañilería publicado en 1859 [1], haciendo referencia al uso de los adobes en la antigüedad describe su elaboración de esta manera: *“Se amasa la tierra con esmero, de modo que presente la consistencia conveniente, y preparada de este modo, se mezcla con una corta cantidad de paja ó con arena para que al tiempo de secarse y al contraerse no se agrieten los adobes”*, confirmando el empleo de este fibrorefuerzo.

En el caso de materiales de matriz cementicia, que en masa tienen un buen comportamiento ante sollicitaciones de compresión pero casi nula para resistir tracción, los primeros planteamientos de refuerzo se dieron a mediados del S.XIX con la incorporación de barras de acero iniciando así el uso del Hormigón Armado [2].

Se mencionan varios nombres de investigadores que en esos años patentaron sus trabajos donde reforzaban el hormigón con mallas de acero. Desde los maceteros del jardinero Joseph Monier en 1849, la barca presentada por Joseph-Louis Lambot en la

Exposición Mundial de París en 1854, se llega a una gran lista de empresarios que toman estas ideas y desarrollaron este nuevo sistema constructivo [3].

Asimismo la mayoría de los autores consideran que los iniciadores del hormigón armado fueron los franceses Monier y Coignet quienes, en 1861, dieron las primeras reglas para fabricar vigas, bóvedas, tubos, etc. [4]

Posteriormente, en 1900, Ludwig Hatschek idea cómo reforzar matrices cementicias, sin árido, con fibras de asbesto, también conocido como amianto. Así nace el asbesto-cemento que originalmente se lo conoció como fibrocemento por ser la única fibra que se empleaba para este fin. Con este material se realizaron, fundamentalmente, placas onduladas para cerramientos superiores, paneles de fachadas ventiladas, tubos de suministro y evacuación de fluidos, depósitos de almacenamiento de agua y conductos en general, por ejemplo chimeneas.

Actualmente existen variedad de fibras empleadas para reforzar varios tipos de matrices: cementicia, epoxídica, plástica o cerámica, [5] pero dadas las características de este trabajo no centraremos, principalmente, en el refuerzo de matrices cementicias.

En el caso morteros fibroreforzados, FRM (del inglés Fibre Reinforced Mortar) u hormigones fibroreforzados, FRC (del inglés Fibre Reinforced Concrete) las primeras experiencias comienzan a mediados del S.XX, empleando fibras metálicas y de vidrio.

La búsqueda por disminuir el recubrimiento de las armaduras para protegerlas en medios agresivos es una de las preocupaciones que llevan a incluir fibras en la masa del hormigón de manera que controlen la fisuración por retracción. Sin embargo, teorías no documentadas, también plantean que los primeros estudios con fibra de vidrio realizados en Rusia, década de 1940, tenían como fin disminuir la cantidad de barras de acero para su empleo en la industria bélica de la Segunda Guerra Mundial.

En esos años también se difunden los potenciales efectos cancerígenos del asbesto que se venían estudiando desde tiempo atrás, por lo cual el empleo de fibra de vidrio comienza a ser una opción como sustituto de las fibras de amianto.

En la década de los años 90 el Banco Mundial se opone a financiar proyectos que contengan asbesto, tanto sea en su producción como en su uso, y el auge de la

construcción prefabricada favorece el empleo y estudio de otras fibras que puedan sustituirlas.

En 2004 más de cien países, representantes de todos los continentes, firmantes del Convenio de Róterdam, que se aprobó en las Conferencias realizadas en Ginebra y Roma, acuerdan prohibir el asbesto, no sin generar polémica con los países exportadores de este material [6]

Años antes, en 1999, la Comisión Técnica de la Unión Europea aprobó la prohibición de uso de cualquier tipo de amianto a partir de 2005, para aquellos países que todavía no lo habían prohibido aún, y en 2006 la Unión Europea realizó una campaña agresiva contra este material.

También en 1999, en el III Encuentro Sindical de Salud Ocupacional Latinoamericano y El Caribe de los trabajadores de la Construcción, se plantea que a pesar de las prohibiciones del uso de asbesto que formularon algunos países para su propio territorio, esos mismos países seguían siendo los mayores exportadores de este material a países que están en la etapa inicial de su desarrollo y donde las normativas aún permiten su empleo [7]. Se menciona el caso de Canadá que, pese a ser uno de los primeros países en prohibir la manipulación del amianto, con una severa regulación, también es uno de los mayores exportadores de amianto a países como India.

Independientemente que existan aún países que emplean asbesto, su prohibición en los países desarrollados y en vías de desarrollo, ha favorecido la aparición de una gran variedad de fibras alternativas para su uso en matrices cementicias: desde las de acero y vidrio mencionadas, hasta las producidas en carbono o kevlar, fibras artificiales como las de polipropileno, poliamida o nylon y naturales como la de celulosa, sisal, yute, coco, etc. [8], así como la continua investigación en nuevos materiales para la producción de las mismas. Particularmente relacionado con este trabajo, existe una continua investigación en cuanto a la incorporación de aquellas fibras que proceden del reciclaje de residuos de difícil gestión tanto industrial como doméstico [9].



## 1.2 Residuos

### 1.2.1 Generación y Gestión.

Los residuos, tanto domiciliarios como industriales, son una preocupación que data de varias décadas dado que su producción se mantiene con el transcurso de los años, representando una pérdida de materiales y energía importantes.

La generación de estos residuos urbanos, así como la peligrosidad que algunos de ellos conllevan, constituyen una agresión creciente al medio ambiente y a la salud pública. Por ello, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), que tuvo lugar en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, dentro de los cinco documentos aprobados se encuentra la "Agenda XXI" donde se recomendó implantar prácticas de reducción de la generación de desechos, aumentar el reciclaje y la reutilización de los residuos y la disposición final de los mismos de forma ambientalmente segura [10].

En base a las temáticas identificadas en la década de '90, en la Cumbre del Milenio del año 2000, los 189 países miembros plasman, en la Declaración del Milenio de las Naciones Unidas, los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), y dos años más tarde, en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible realizada en Johannesburgo, se terminan de definir las metas bajo el Objetivo 7: Garantizar la Sostenibilidad del Medio Ambiente.

La gestión de residuos sólidos produce una pequeña cantidad de dióxido de carbono en el almacenamiento inicial, transporte y durante su tratamiento y disposición final en

basurero a cielo abierto, y procesos de oxidación de la materia orgánica como el compostaje aerobio y la incineración, por lo cual su disminución sería un pequeño aporte para mejorar la problemática del efecto invernadero, incluido en este Objetivo. Pero la mayor contribución a este fenómeno se encuentra en los procesos anaerobios de descomposición, relleno sanitario por ejemplo, que generan metano el cual tiene un efecto invernadero veinte veces mayor que el que produce el dióxido de carbono.

Sobre las bases mencionadas, se plantean Estrategias de Desarrollo Sostenible, tanto en la Unión Europea (UE) como en los países de América Latina y el Caribe (ALC), consistentes en determinar y elaborar medidas que permitan mejorar continuamente la calidad de vida. Uno de los objetivos dentro de la Estrategia de Sostenibilidad Ambiental es reducir la generación de residuos y fomentar la reutilización y el reciclaje de los generados[11].

Asimismo, independientemente del continente donde nos encontremos, la intensidad de residuos urbanos muestra la evolución y relación entre la generación total de los mismos y el Producto Interior Bruto (PIB) del país donde se producen. Su formación, estrechamente vinculada con los modelos de producción y consumo, expresan la eficiencia en el ciclo de materiales, desde su extracción hasta el momento en el que son desechados [12].

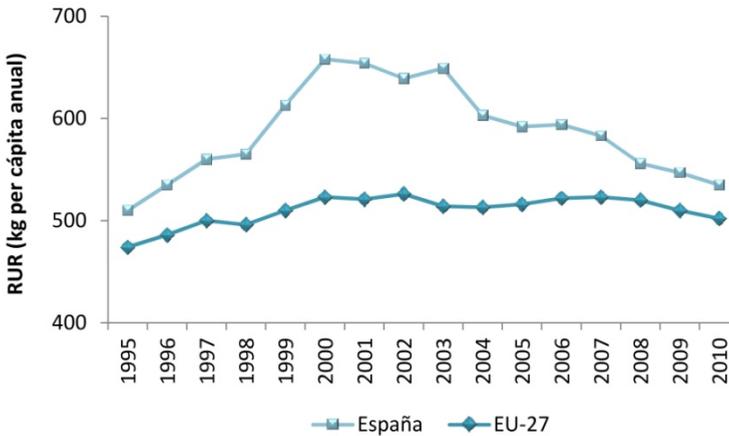
El desacoplamiento entre el crecimiento económico (PIB) y la mayor generación de residuos es uno de los retos de la sociedad. Existiendo un desacoplamiento relativo en los primeros años de este siglo, donde los residuos han crecido en menor proporción que el PIB, la meta es llegar a un desacoplamiento en términos absolutos, donde la generación de residuos disminuya a pesar de que exista un crecimiento económico, priorizando, además de la prevención, la reutilización y el reciclaje antes que sistemas de disposición final en incineradoras y vertederos, que continúan primando.

### 1.2.1.1 Generación de Residuos en la Unión Europea (UE)

A través de la fuente de información Eurostat [13], en la última década y media evaluada (1995/2010) los Residuos Urbanos Recogidos per cápita en la Unión Europea (27 países) han variado escasamente. Después de un incremento del 10% hasta el año 2000, la tendencia ha sido decreciente estableciéndose un aumento del 5% al final del período

respecto a 1995. En igual período España mantiene las tendencias con un incremento del 29%, hasta principios de siglo, presentando luego un brusco descenso, con una disminución mayor que la media europea logrando superar solamente en un 6% las tasas de 1995, como se puede apreciar en la Figura 1.1.

Figura 1.1 - Residuos Urbanos Recogidos (RUR) en Unión Europea (27 países) y España.  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT, Estadísticas sobre residuos



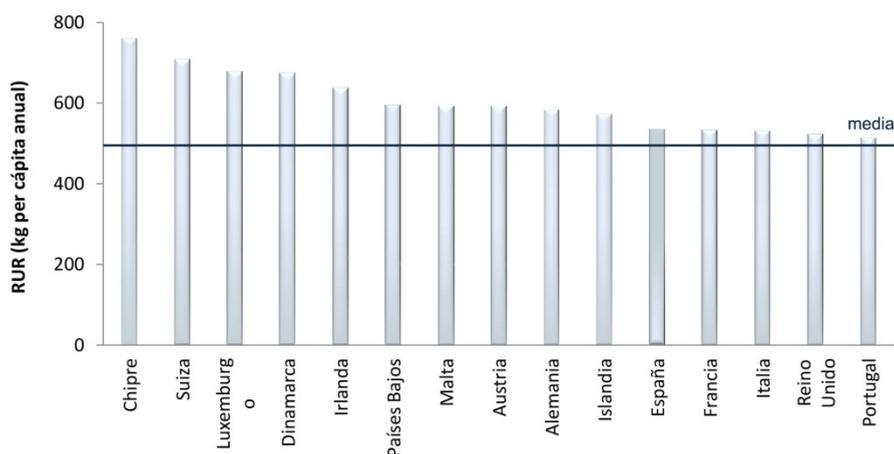
Aún no se ha conseguido una reducción absoluta mantenida en la generación de residuos, lo cual indica que continúan siendo necesarios cambios en los modelos de producción y consumo así como en las políticas de los residuos para maximizar la prevención, la reutilización y el reciclado.

Estos valores indican un acercamiento al objetivo general del Plan Nacional Integrado de Residuos (PRIN) 2008-2015 [14], de modificar la tendencia de crecimiento de generación de residuos. A pesar de ello, al coincidir con la crisis económica europea, y particularmente española, esta disminución podría entenderse como consecuencia de la suma de ambos factores debiéndose esperar a que se restablezcan los niveles económicos para poder extraer mejores conclusiones.

Independiente de las posibles causas, si analizamos la producción de estos residuos per cápita en España en comparación con los países de la Comunidad Europea (27 países) en el último año evaluado (2010), se aprecia que ocupa el décimo primer lugar en la

generación de Residuos Urbanos Recogidos (RUR), superando la media europea, con valores similares a Francia e Italia (Figura 1.2).

Figura 1.2 - Residuos Urbanos Recogidos (RUR) en países de la Unión Europea (2010)  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT, Estadísticas sobre residuos.



### 1.2.1.2 América Latina y el Caribe (ALC)

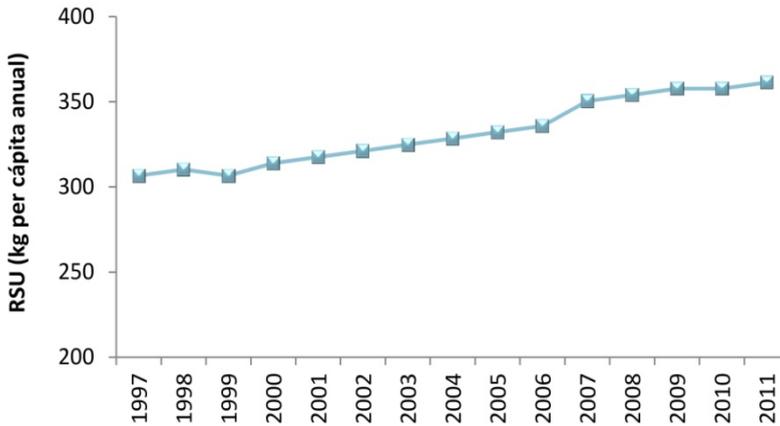
En estos países también se puede apreciar la relación directamente proporcional entre la producción de residuos y el PIB, a lo cual se puede añadir la relación directa entre la generación y el Índice de Desarrollo Humano (IDH), que combina valores de actividad económica con niveles de educación y salud.

Para visualizar el crecimiento constante de generación de residuos podemos ejemplificar con la realidad en México, país que ocupa la segunda posición en cuanto a población con un Índice de Desarrollo Humano medio dentro de este conjunto de países, y que, junto a Brasil, integran la lista de los 10 países con mayor generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) anuales por ser países con gran número de habitantes [15]. Accediendo a sus valores estadísticos a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT) [16] se han representado en la Figura 1.3

Analizando este período (1997-2011), se observa un constante crecimiento en la producción Residuos Sólidos Urbanos (RSU) per cápita, finalizando el período con un incremento del 18%.

Figura 1.3 - Residuos Sólidos Urbanos (RSU) recolectados por año en México.

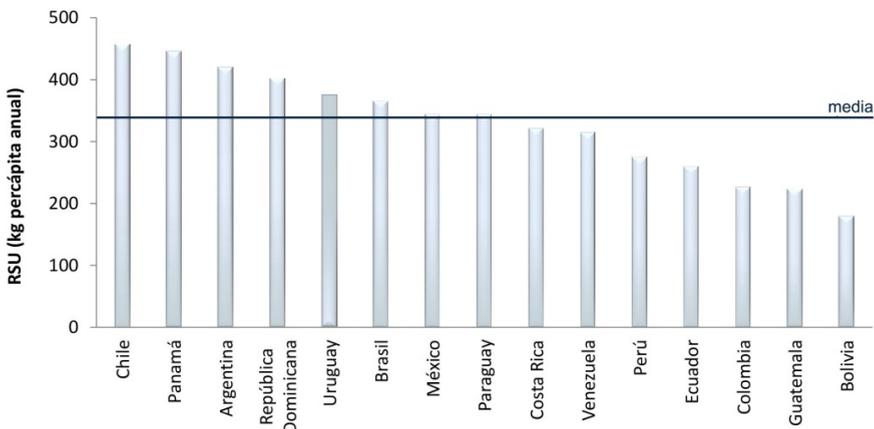
\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



Por otra parte, si analizamos la generación de residuos per cápita anuales en estos países en 2010, se puede apreciar que México se encuentra dentro de los valores medios, mientras Uruguay supera esa media en un 10%, ocupando el quinto lugar en la generación de Residuos Sólidos Urbanos después de Chile, Panamá, Argentina y República Dominicana (Figura 1.4)

Figura 1.4 - Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en América Latina y el Caribe 2010.

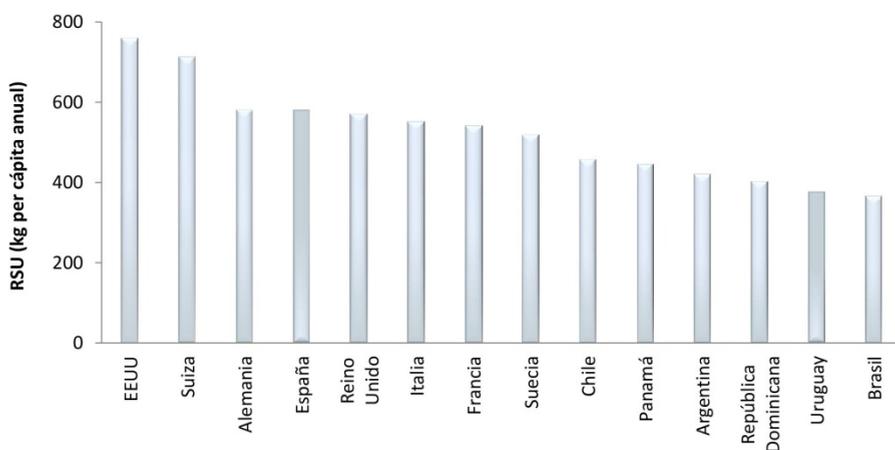
\*Elaboración propia, fuente: Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.



Comparando estos valores con otros países de América y Europa, destaca Estados Unidos de América (EEUU) como el mayor generador de residuos y, con un nivel menor a la media europea, los países de América Latina y el Caribe. Se han representados estos valores en la Figura 1.5, tomando como referencia alguno de los países europeos con valores máximos y medios y de América Latina y el Caribe los seis que figuran como mayores generadores de residuos.

Figura 1.5 - Generación de Residuos Sólidos Urbanos en EEUU, Europa y ALC 2010.

\*Elaboración propia, fuente: Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.



Estos análisis demuestran que, si bien existen voluntades para minimizar la producción de residuos, todavía queda mucho trabajo por hacer para que estas políticas puedan ser generalizables y se reviertan las tendencias.

## 1.2.2 Tratamiento y Disposición final

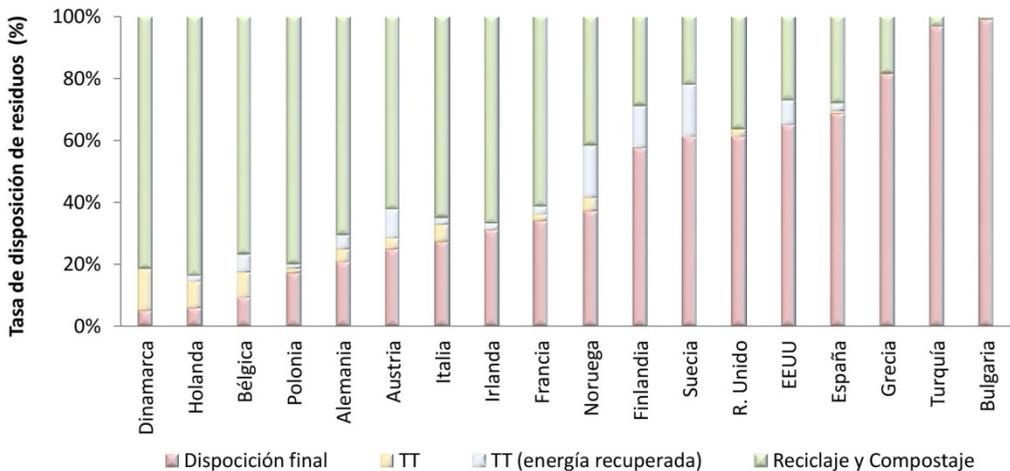
Paralelamente a estas voluntades de reducción en la producción de residuos también han ido variado las tendencias en cuanto a tratamiento y disposición final de los mismos.

Previas a la disposición final de los residuos, las principales alternativas de tratamiento se pueden clasificar en: compostaje, reciclaje y tratamiento térmico; este último con o sin aprovechamiento energético de los residuos.

Si bien los procedimientos de tratamiento térmico aún son muy nuevos en América Latina y el Caribe, se utilizan ampliamente en los países desarrollados. Como se puede ver en la Figura 1.6 varios países contaban, en el año 2006, con altos porcentajes de tratamiento permitiendo disponer finalmente proporciones relativamente pequeñas en rellenos sanitarios.

Figura 1.6 - Disposición Final y Tratamientos empleados en Países Desarrollados, 2006

\*Elaboración propia, fuente: Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.



También se aprecia que en los últimos años, ante la constante europea de darle tratamiento al 95% de los residuos generados, en España se produce un incremento del tratamiento de residuos, llegando al 100% a partir de 2006 (Figura 1.7 y Figura 1.8).

Este incremento se produce especialmente por la incorporación del compostaje a partir de finales de los años '90. Paralelamente aumentan levemente los porcentajes de reciclaje y se envían más residuos a incinerar que los depositados en vertederos.

Durante el período de 1995 a 2009, la gestión de residuos en vertederos disminuyó un 7.5%, que fue opuesta a la tendencia de tratamiento por incineración lo cual se incrementó en, prácticamente, un 100% [12]

Figura 1.7 – Tratamiento de Residuos Municipales Generados en la Unión Europea (27 países)

\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.

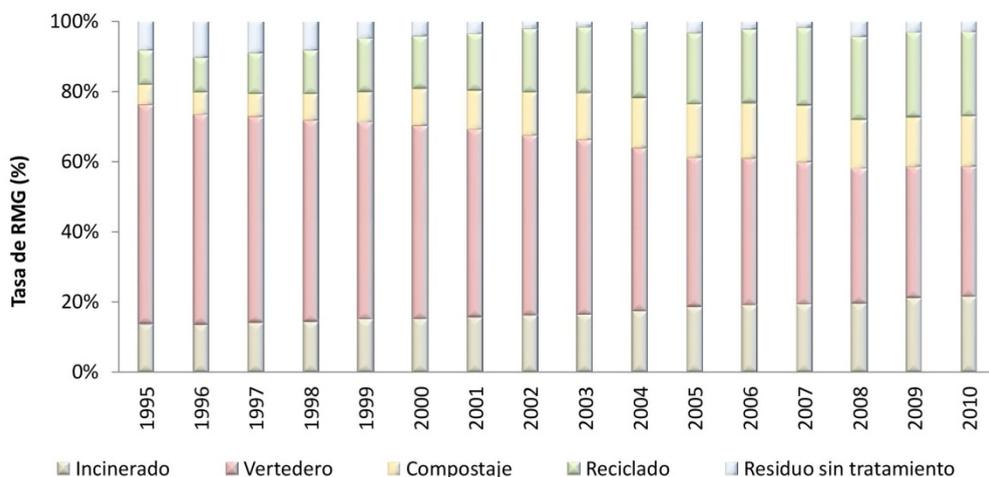
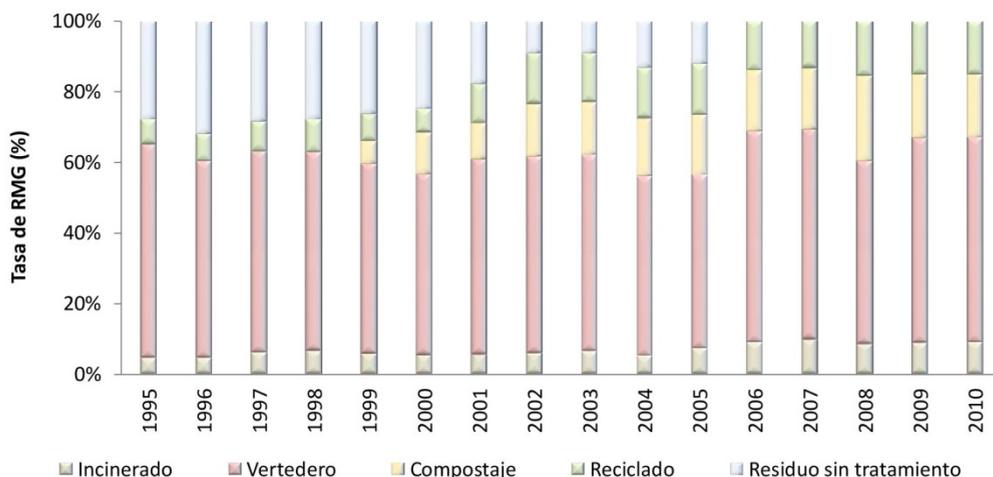


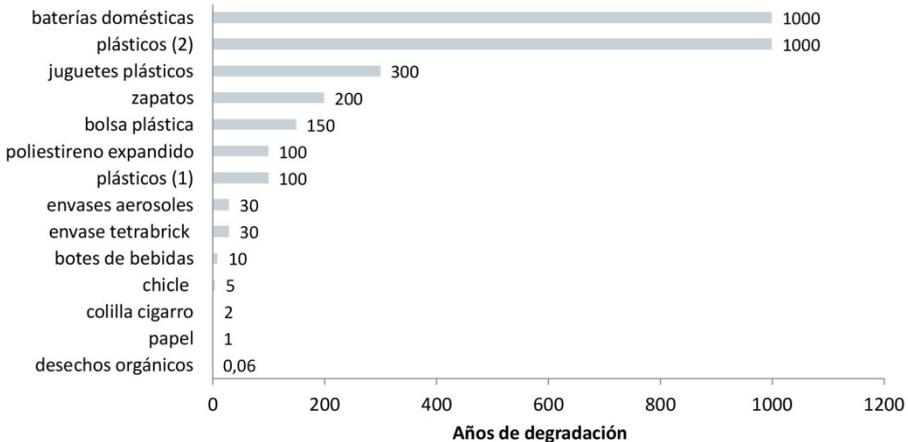
Figura 1.8 - Residuos Municipales Generados según tratamiento en España.

\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



En función del tipo de residuo, si se deposita en vertedero, el tiempo necesario para su degradación variará (Figura 1.9), por lo cual esta opción requiere de una selección exhaustiva de los mismos si se desean minimizar los efectos en el medio ambiente.

Figura 1.9 - Años necesarios para la degradación en función del tipo de residuo.  
\*Elaboración propia, fuente: SUSTENTA [17]



plásticos: (1) = de rápida degradación – (2) = de lenta degradación

Consecuentemente, en la Unión Europea se aprecia una disminución importante en el porcentaje de residuos que se disponen en vertederos. Del 60% se pasa al 37% del total de residuo municipal generado, aumentando un 14% en el reciclaje y un 8% en incineración y compostaje (Figura 1.7).

No obstante, en España, aunque la generación de residuos per cápita ha disminuido y se realiza el tratamiento de la totalidad de los mismos, el porcentaje de residuos que se disponen en vertederos se mantiene alrededor del 60%, aumentando escasamente la incineración y el reciclaje, e incrementándose en mayor medida los tratamientos en compostaje (Figura 1.8).

Paralelamente la realidad en América Latina y el Caribe muestra que la disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) sigue siendo un problema difícil de resolver.

El relleno sanitario es el principal sistema empleado para disponer estos residuos de forma económica y ambientalmente segura. Este sistema cuenta con proyecto de ingeniería que indica el procedimiento a seguir para el manejo adecuado de gases y lixiviados que se producen en la descomposición de los residuos.

En los últimos años se ha comenzado a emplear el término “vertedero controlado” al referirse a vertederos a cielo abierto con algún tipo de control o a rellenos sanitarios

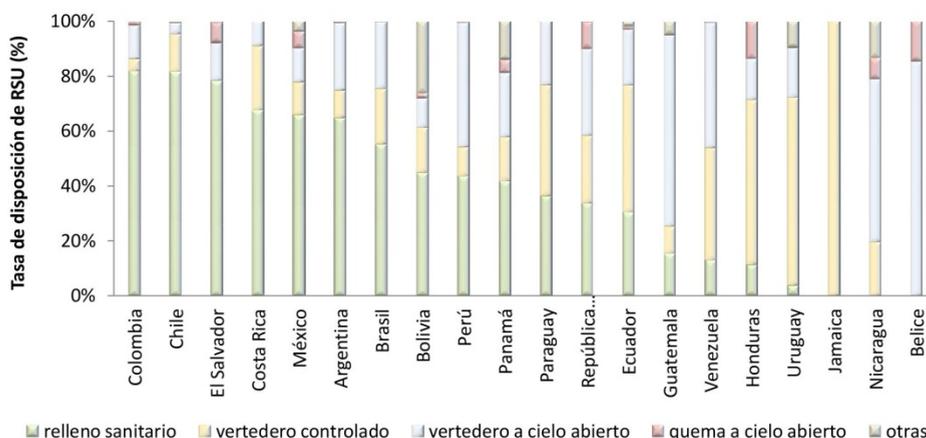
que han sido abandonados y perdieron las características para ser considerados como tal. No obstante se siguen empleando vertederos a cielo abierto, que considerados uno de los factores más contaminantes para el ambiente y perjudiciales para la salud, representan una mala gestión de los residuos sólidos. Todavía es común encontrar personas que trabajan en estos vertederos en condiciones insalubres realizando clasificación de materiales aprovechables.

Otra de las prácticas altamente contaminantes que aún se puede encontrar en alguno de estos países es la quema de residuos a cielo abierto, son arrojados al agua o se emplean como alimento de animales.

Los porcentajes de empleo de cada uno de los tratamientos en estos países se pueden apreciar en la Figura 1.10.

Figura 1.10 - Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en países de América Latina y el Caribe

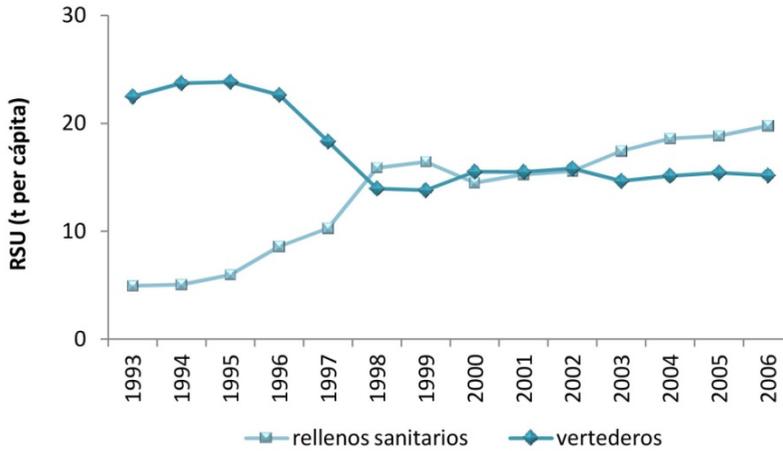
\*Elaboración propia, fuente: Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.



Tomando nuevamente como ejemplo a la realidad mexicana, se puede observar la tendencia de cambio en la disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos a lo largo de una década y media. En la Figura 1.11 se aprecia como la cantidad de residuos que se disponen en vertederos decrece a medida que va adquiriendo mayor volumen aquellos que se disponen en rellenos sanitarios.

Figura 1.11 - Disposición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en México.

\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



### 1.2.3 Composición y Características de los Residuos

Al hablar de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o Residuos Sólidos Municipales (RSM) nos referimos a los residuos provenientes de las actividades propias de los núcleos poblacionales. Incluyen residuos de origen domiciliario, comercial, servicios, mercados, hospitalarios e industriales no peligrosos, oficinas, barrido y limpieza de calles y áreas públicas, poda de plantas de calles, plazas y jardines.

Los RSU, si bien son el objetivo principal de las mediciones estadísticas, constituyen un porcentaje menor dentro de los residuos que se generan diariamente en un país. Existen otras actividades generadoras de residuos en mayor cuantía como son el Sector Energético y la Construcción.

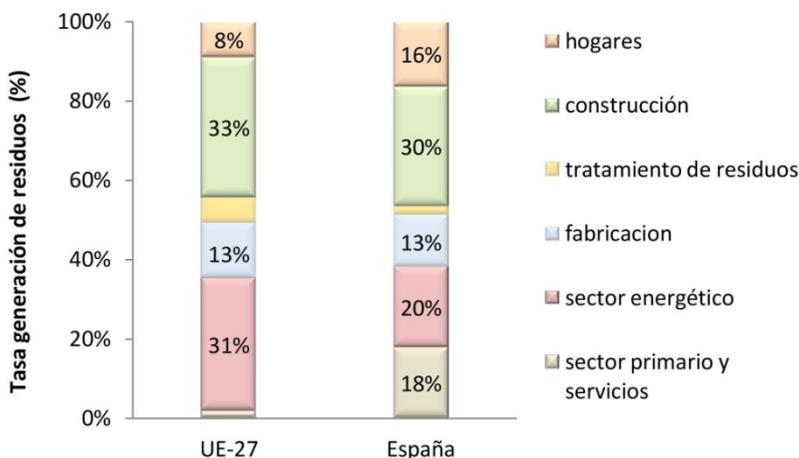
La proporción que la actividad de los hogares aporta a los residuos totales en los países de la Unión Europea (UE) se ha mantenido entre los años 2004 y 2008 en un 8%, mientras que los sectores construcción y energía aportan poco más del 30% cada uno de ellos y el Sector servicios es menor al 10% (Figura 1.12).

Si analizamos la distribución de los residuos generados en España, en igual período de tiempo, se destaca que el porcentaje de residuos provenientes de hogares es el doble

que la media europea, 15%, y los residuos generados por el sector energético son del orden del 20% al igual que el sector primario (Figura 1.12)

Figura 1.12 – Composición de Residuos por actividad en la Unión Europea (27 países)

\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



Por otra parte, si analizamos dentro de esos residuos cuales son los tipos más abundantes, nos encontramos que los minerales y residuos solidificados en España ocupan más del 50% del total de residuos, llegando al 70% en la media europea (Figura 1.13 y Figura 1.14)

Figura 1.13- Generación de residuos por categoría en España (2008)

\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.

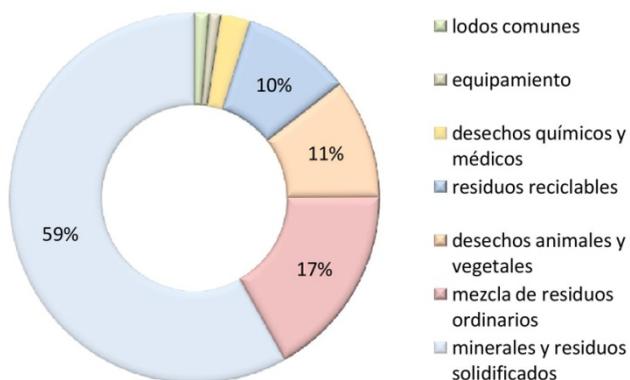
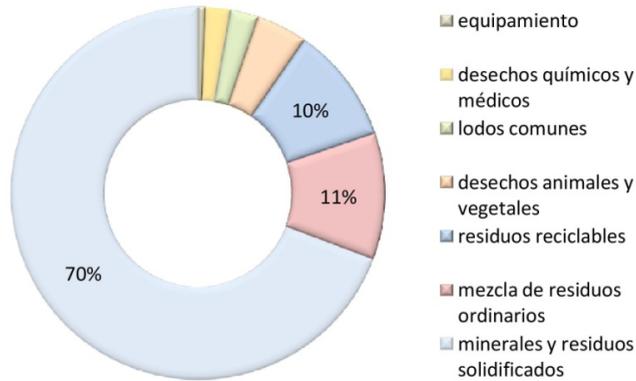


Figura 1.14 - Generación de residuos por categoría en la Unión Europea 27 países, (2008)  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



Si siguiendo la mezcla de residuos ordinarios, los residuos reciclables ocupan el tercer y cuarto puesto, en la media europea y España respectivamente, con valores en el entorno del 10% del total de residuos.

Si estos residuos los acotamos a los producidos en los hogares, podemos observar que existe una gran proporción de mezcla de residuos ordinarios en España, un 86% del total, superior al 70% de la media europea (Figura 1.15), existiendo apenas un 8% de materiales potencialmente reciclables, la mitad del 16% que presenta la media de los 27 países de la Unión Europea (Figura 1.16).

Figura 1.15 - Generación de residuos por categoría en Hogares de España, 2008  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.

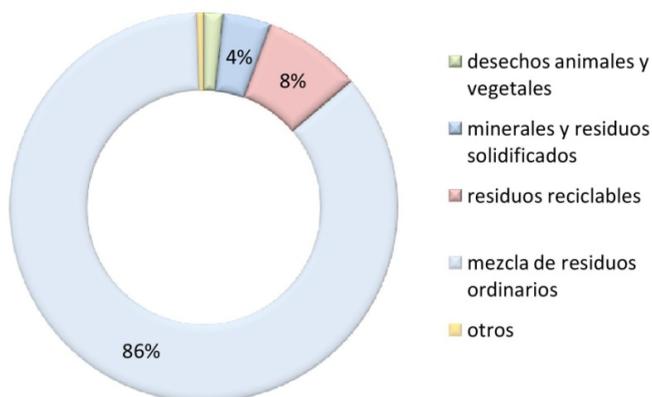
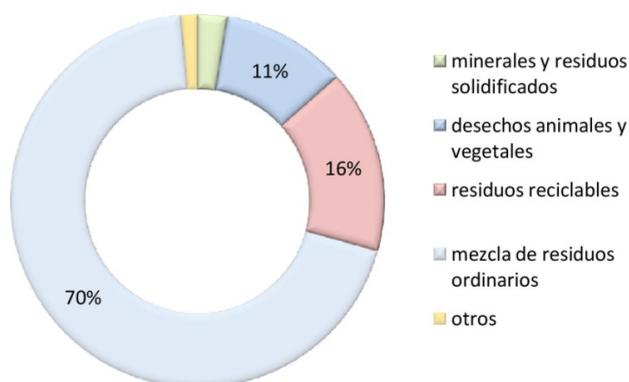


Figura 1.16 - Generación de residuos por categoría en Hogares de la Unión Europea, 2008

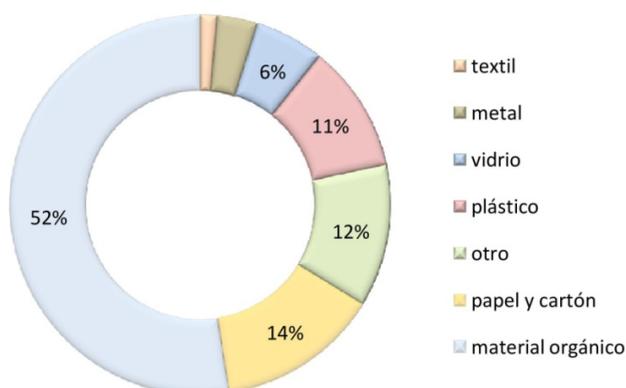
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



Los diferentes criterios empleados por las agencias estadísticas europeas y americanas nos impiden realizar un paralelismo en sus datos. Asimismo, ejemplificando nuevamente con la situación mexicana, se puede apreciar que el material orgánico representa el mayor porcentaje, más del 50%, siendo los materiales potencialmente reciclables (fundamentalmente plástico, vidrio, papel y cartón) un 30% aproximadamente y los metales solamente un 3% (Figura 1.17).

Figura 1.17 - Generación de Residuos Sólidos Urbanos por tipo de residuo en México (2011)

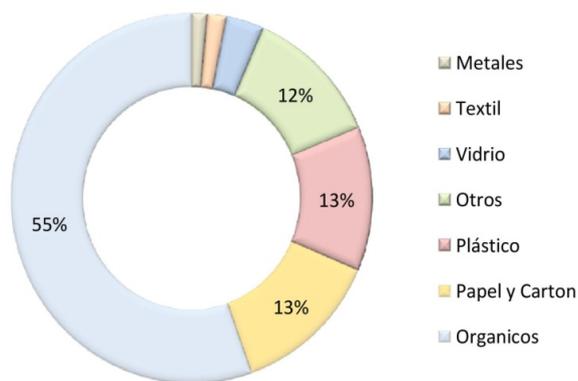
\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



Esa misma tendencia se puede apreciar en la República Oriental del Uruguay, (Figura 1.18) donde, según datos obtenidos del Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana [18], del año 2005, los residuos orgánicos representan más del 50% del total de los residuos sólidos urbanos (RSU), y los materiales potencialmente reciclables en el entorno del 30%.

Figura 1.18 - Composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en la R.O. del Uruguay (2005)

\*Elaboración propia, fuente: Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo, 2005.



La diferencia de tendencias observadas entre países europeos y latinoamericanos se entiende analizando el grado de industrialización de los países que componen estos dos grupos. Ante una mayor industrialización los materiales metálicos son utilizados en mayor proporción y por ello tienen mayor trascendencia en la cantidad total de residuos generados.

Sin embargo, en países en vías de desarrollo, la producción de residuos mayoritaria se centra en los residuos orgánicos, producto del consumo de su población, especialmente en América Latina y el Caribe donde la población se encuentra altamente urbanizada, un 79% vive en ciudades, además de existir grandes diferencias entre países o incluso dentro de las distintas ciudades de un mismo país, en los sistemas de recolección.

## 1.2.4 Residuos Reciclables

Como se ha visto en las Figura 1.13 a Figura 1.18, dentro de los residuos existen materiales reciclables, cuya proporción varía en función del grado de desarrollo de los

países e incluso, en América Latina y el Caribe, pueden variar en función de la zona del país o de la ciudad donde se produzcan.

En los países europeos se puede observar que constituyen desde un 10% de los residuos totales a un 16% de los residuos domiciliarios, y en el caso de los países de América Latina y el Caribe en el entorno del 30% de los residuos sólidos urbanos.

A pesar de estas proporciones aún existe una brecha entre las cantidades recicladas en los países desarrollados y en los países de la región de América Latina y el Caribe [10]. Las causas se pueden encontrar, principalmente, en que la generación y composición de residuos de la región americana es totalmente distinta a la de los países desarrollados, en particular tomando como referencia los países europeos.

La clasificación en origen, si no es diseñada correctamente, es mucho más cara que la que se realiza a granel, por lo cual, en países no desarrollados, ésta última continúa siendo el procedimiento aplicado, dificultando los procesos de selección de materiales reciclables.

Por otra parte, en estos países en vías de desarrollo, la disposición final en rellenos sanitarios sigue siendo la opción económicamente viable. El reciclaje, compostaje y recuperación de energía a través de la incineración son procedimientos bastante más costosos.

Estas formas de disposición final acompañada de la composición de los residuos, dificultan el reciclaje. Casi el 50% de los residuos generados en América Latina y el Caribe están compuestos por agua, la cual, además de que no se puede reciclar, humedece y contamina los materiales reciclables, principalmente a los compuestos de papel y cartón.

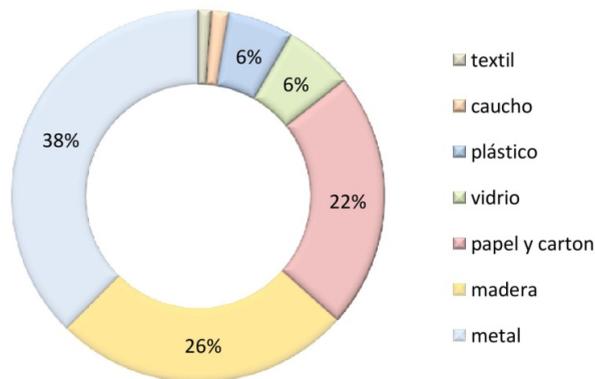
A pesar de las diferencias entre grados de desarrollo de los distintos países los materiales que se incluyen dentro de la categoría de reciclables son básicamente los mismos:

- residuos metálicos;
- residuos de madera;
- residuos de papel, cartón y productos de papel;

- residuos de vidrio;
- residuos plásticos;
- residuos de caucho y
- residuos textiles

Estos residuos se distribuyen en distintas proporciones según el grado de desarrollo del país, encontrando que en la media de los 27 países de la Unión Europea los tres primeros (metal, madera, papel y cartón), constituyen un 86% de los residuos reciclables, seguidos por vidrio y plástico con 6% cada uno y en mucha menor magnitud los residuos de caucho y textiles. (Figura 1.19)

Figura 1.19 - Distribución de los residuos reciclables en la Unión Europea (27 países), 2008.  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



Analizando la situación española (Figura 1.20) se puede observar que los porcentajes de estas tres categorías disminuyen, sumando el 75% de total de residuos reciclables, aumentando los residuos plásticos y de vidrio que suman el 21%.

La situación de América Latina y el Caribe, tomando como referencia nuevamente a México por sus características de población e Índice de Desarrollo Humano, se observa que desde el año 2008 al 2011 se mantienen los porcentajes que ocupan cada una de las categorías de residuos, existiendo un aumento considerable en el que contempla a los residuos plásticos en detrimento, fundamentalmente, de la tasa correspondiente a los residuos de vidrio, papel y cartón (Figura 1.21). Dado que estos residuos son provenientes, principalmente, del uso post-consumo de envases y embalajes, se puede

entender que, en esos años, se produjo un cambio del empleo de esos materiales para estos usos.

Figura 1.20 - Distribución de los residuos reciclables en España, 2008.  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.

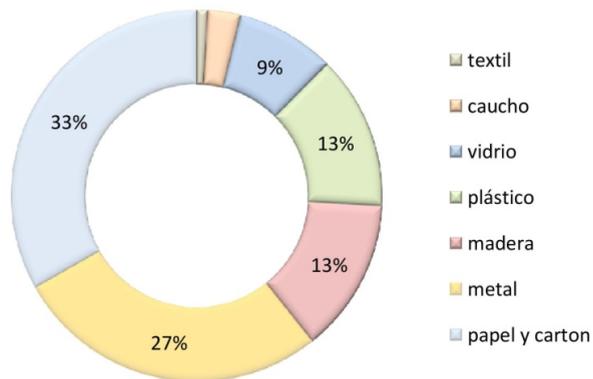
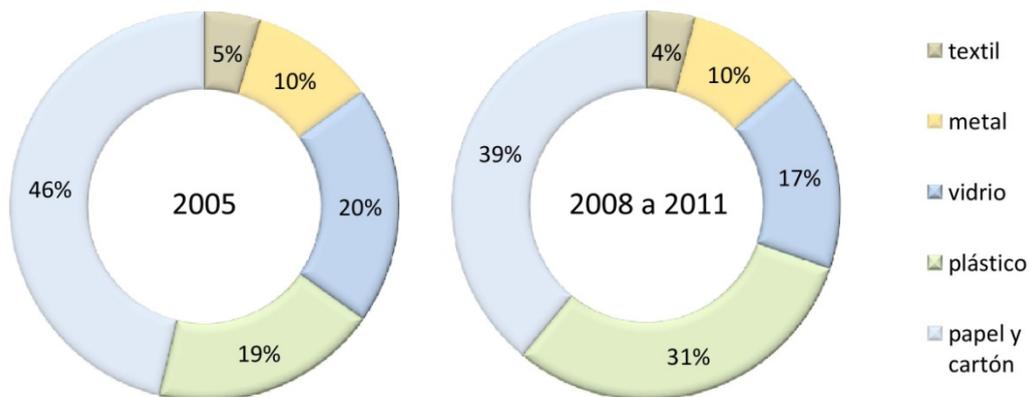


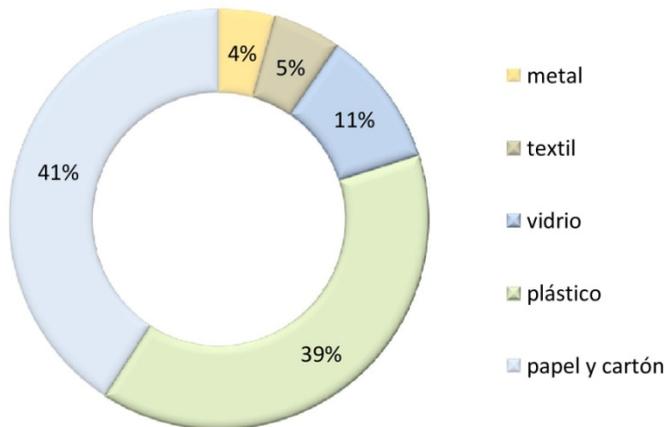
Figura 1.21 - Distribución de los residuos reciclables en México, 2005 y 2008 a 2011.  
\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



En contraposición dentro de América Latina podemos ver el caso de la República Oriental del Uruguay, que cuenta con menos de un 3% de la población mexicana. La tasa de residuos de papel y cartón, en el año 2005, mantienen las mismas proporciones que las mexicanas pero se aprecia una gran diferencia en cuanto a los residuos de plástico y vidrio (Figura 1.22). Variación que coincide con el cierre de la empresa Cristalerías del

Uruguay, quien producía la mayor parte de los envases de vidrio hasta ese momento. Esto nos muestra nuevamente el cambio de material empleado para envases en esos años.

Figura 1.22 - Distribución de los residuos reciclables en la Rep. Oriental del Uruguay, 2005  
\*Elaboración propia, fuente: Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo, 2005.



### 1.2.5 Residuos Plásticos (sintéticos)

Dentro de los residuos reciclables, complementando lo planteado en la Figura 1.9, los más complejos desde el punto de vista de su disposición final lo constituyen los plásticos.

Su degradación natural puede producirse entre 100 y 1000 años y particularmente, dentro de los Residuos post consumo, este material va adquiriendo mayor importancia, principalmente en el momento de definir su destino final el cual, por su volumen, genera elevados costos de almacenamiento.

Su uso se ve incrementado en envases y embalajes, tanto en el Sector Servicios como Alimentación, lo que hace que su porcentaje sea importante dentro de la generación de residuos urbanos, aunque la mayor preocupación proviene de aquellos residuos que no son recolectados sino abandonados creando puntos de concentración y contaminación medioambiental (Figura 1.23).

Figura 1.23 - Residuos abandonados en la costa mediterránea.

Autor/a: Ma. Esther Fernández (enero de 2011)



Referido a este abandono podemos ejemplificarlo con la formación de la “isla de basura”, también denominada “sopa de plástico”, que se encuentra en el Océano Pacífico y cuyo tamaño es, aproximadamente, tres veces la superficie de la península ibérica. De igual manera se encuentra en el Océano Atlántico Norte una “mancha de basura” descubierta en 2009, ambas producto de la unión de desechos arrastrados por las corrientes oceánicas.

Estos basureros oceánicos se caracterizan por tener concentraciones excepcionalmente altas de plástico suspendido con otros restos que se han visto atrapados en ellos. A diferencia de los desechos biodegradables, estos plásticos son fotodegradables o sea que la forma de desintegrarse es transformándose gradualmente en trozos más pequeños, permaneciendo como polímeros, y continuando así el proceso hasta llegar a nivel molecular.

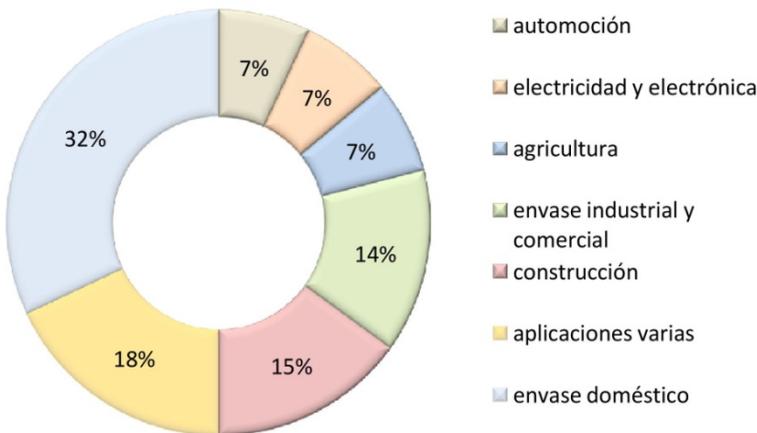
Al convertirse en trozos cada vez más pequeños, se concentran en la parte superior hasta que se desintegran, y el plástico al final llega a ser de un tamaño tan pequeño que puede ser ingerido por los organismos marinos que viven cerca de la superficie del océano. Por lo tanto, los residuos de basura que flotan en los océanos terminan entrando por completo en la cadena alimenticia.

Estudios realizados en la Institución Scripps de Oceanografía de la Universidad de California en San Diego, muestran que cerca del 10% de los peces estudiados contenían restos de plástico en sus estómagos [19]. Algunas partículas encontradas eran tan pequeñas, menores al tamaño de la cabeza de un alfiler, que fue imposible reconocer su origen.

Esto sin mencionar que antes de llegar al nivel molecular, muchos de estos residuos, producen graves problemas en la fauna marina, tanto sea asfixia por su ingestión como deformaciones o la misma muerte por quedar atrapados en ellos.

En cuanto al uso de este material, tomando como referencia la realidad española expresados en los Informes de Cicloplast [20], se puede observar que la mayor tasa corresponde a envases tanto domiciliarios como industriales con un 46% de incidencia del total (Figura 1.24), seguidos por el uso en materiales de larga vida como es el caso de los empleados en construcción, automoción y electrónica.

Figura 1.24 - Consumo de plásticos por actividad en España. 2009  
\*Elaboración propia. Fuente: Informe Cicloplast 2009

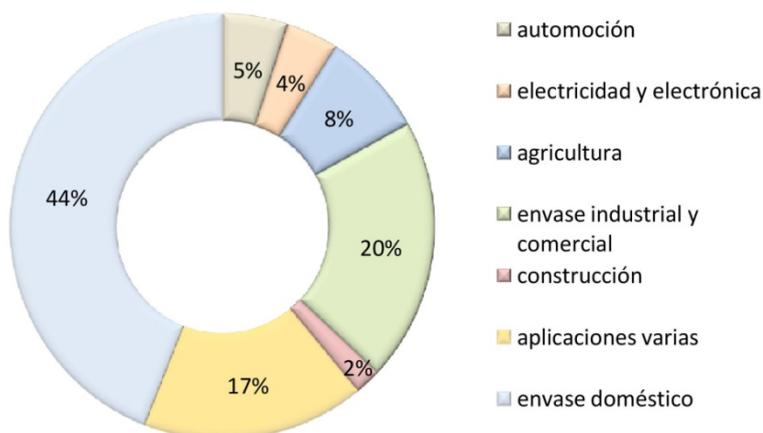


De esos plásticos empleados, se transforman en residuos computables distintas proporciones en función de la actividad que lo emplea. Es así que podemos observar que casi la mitad de residuos plásticos, 44%, proviene de los envases de uso doméstico (Figura 1.25). Sumados a los residuos provenientes de envases industriales y comerciales conforman el 64% del total de residuos plásticos. Esta proporción reafirma la idea de

que estos elementos continúan siendo el objetivo primordial en el momento de su disposición final, tanto por su lenta degradación como por el volumen que ocupan.

Figura 1.25 - Residuos plásticos por actividad en España. 2009

\*Elaboración propia. Fuente: Informe Cicloplast 2009



### 1.2.6 Reciclaje de Residuos Plásticos.

Las políticas medioambientales presentes desde hace años han instado enérgicamente al empleo de la reutilización y el reciclaje antes que la disposición de residuos en incineradoras, vertederos o rellenos sanitarios, principalmente de los residuos plásticos donde estas técnicas se encuentran más desarrolladas.

Entendiendo el reciclaje como la actividad mediante la cual determinados residuos sólidos son separados, recogidos, clasificados y procesados para ser reincorporados a un ciclo doméstico, comercial o industrial, es necesario analizar cada una de estas etapas dentro del ciclo de los plásticos.

Desde el punto de vista de su recogida y clasificación tenemos que el grado de industrialización y desarrollo de cada país nos permite realizar esta actividad de una forma con mayor o menor eficiencia.

Países desarrollados donde existen políticas de recolección selectiva (Figura 1.26) y ya concientizada la población, se pueden recuperar mayor cantidad de estos materiales, y en mejores condiciones, para su posterior procesado.

Figura 1.26 - Contenedores para recolección de Papel y Plástico españoles.  
Autora: Ma. Esther Fernández (agosto de 2012)



Sin embargo, en la mayoría de los países en vías de desarrollo aún no se ha logrado realizar este tipo de recolección, no alcanzando este grado de recuperación de materiales.

Coexiste con la recolección municipal la que realizan los segregadores. Estas personas son las que se dedican a la recuperación y venta de los materiales desechados en forma independiente, son trabajadores informales de la basura.

Según cada país se los conoce por un nombre distinto: pepenadores, cachureros, recicladores informales, gancheros, buzos, entre otros [10].

En la República Oriental del Uruguay depende del tipo de residuo que recolecte se lo denomina cartonero o hurgador, siendo este último el nombre el que, comúnmente, se relaciona con los residuos plásticos (Figura 1.27).

Figura 1.27 – Hurgador de materiales plásticos Montevideano - República Oriental del Uruguay  
Autora: Ma. Esther Fernández (junio de 2008)



La evaluación realizada en 2010 estimó que existen casi 9 segregadores por cada 10.000 habitantes en los países de América Latina y el Caribe lo cual serían un poco más de 400.000 personas [10]. Las condiciones de trabajo, en la gran mayoría, son precarias lo cual, unido a la informalidad, generan problemas de tipo social, ambiental y de gestión. Se estima que solo un 19% de estas personas se encuentran agrupados en asociaciones.

En cuanto al posterior procesado de estos materiales encontramos que este puede ser realizado por medios mecánicos, donde mediante el corte total o parcial del residuo se obtienen partes para los nuevos elementos.

Un ejemplo literal de esta situación lo constituye la empresa Kubitz, soluciones sociales y ambientales [21] donde, mediante su Planta de Escobas, transforma el cuerpo de envases post-consumo de polietileno tereftalato (PET) en escobas y cepillos. Con este proyecto para la generación de empleo, renta e inclusión social, además de generar una fuente de trabajo, retiran del medio ambiente alrededor de 3000 envases diarios.

Sin embargo, el reciclaje mecánico más extendido es aquel que, mediante procesos de molienda, lavado, extrusión y granceado se obtiene granza o pelets del material que luego se procesarán por distintos procedimientos.

Otro procedimiento para el reprocesado de plásticos es el reciclaje químico mediante el cual se realizan cambios en la estructura química del material. Se realiza una despolimerización del material para obtener nuevamente los monómeros que lo componen requiriendo para este proceso que el residuo sea lo más homogéneo posible para obtener un producto final de calidad garantizada [22].

El reciclaje químico puede realizarse mediante diferentes procesos que pueden clasificarse en: Despolimerización térmica, solvólisis, disolución, y valorización energética.

La despolimerización térmica es la que permite obtener los monómeros mediante el aporte de calor como puede ser la pirolisis, el hidrocraqueo y el craqueo térmico.

En la solvólisis quien actúa como reactivo en la despolimerización es un disolvente y función del que sea empleado será: hidrólisis, metanólisis o glicólisis.

Por último, la valoración energética, es el proceso de recuperación de energía contenida en los gases y el rendimiento que se puede obtener depende del proceso empleado. En algunos casos puede ser considerado como un proceso de reciclaje térmico más que químico. Además de la pirolisis mencionada, esta valoración también se puede realizar mediante un proceso de combustión, oxidación a altas temperaturas, o en un proceso de gasificación donde se realiza la combustión en defecto de oxígeno.

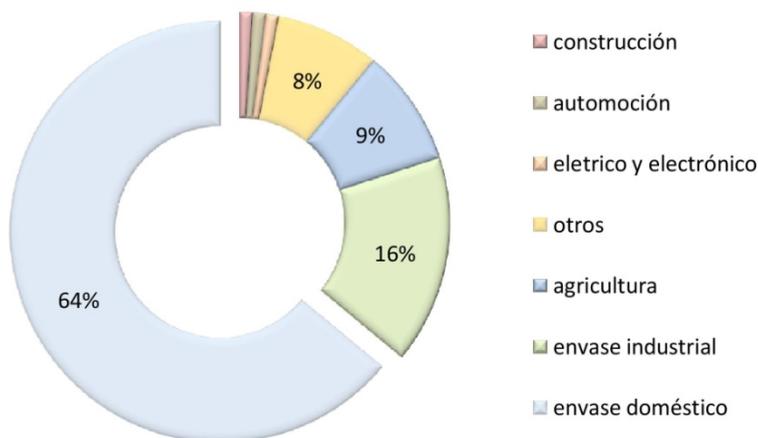
Pero la existencia de todas estas técnicas de reciclaje no implica que se recicle el 100% de los residuos plásticos que se producen. En primer lugar porque no todo residuo cuenta con la calidad necesaria para ser reciclado, sea por ser un material contaminado de pigmentos o tintes de impresos, sea porque los procesos necesarios para el reciclaje no compensan económicamente en el costo del producto final.

Comparando con los porcentajes mencionadas en la Figura 1.25, en cuanto la producción de residuos plásticos según actividad en España, se puede ver que las tasas de reciclaje de esos residuos no coinciden en valor (Figura 1.28).

Se mantiene que los residuos provenientes de envases, domiciliarios e industriales, constituyen la mayor proporción, pero de un 64% que representaban en la producción de residuos pasan a constituir el 80% en cuanto a materiales plásticos reciclados.

Figura 1.28 – Tasas de reciclado de plástico por origen en España. 2009

\*Elaboración propia. Fuente: Informe Cicloplast 2009



Este fenómeno podría explicarse por la diferencia de polímero empleados, mayoritariamente, en cada uno de los rubros. Los empleados en los envases presentan mejores características en el momento de la despolimerización que los utilizados en otras actividades como la automoción, construcción ó en electrónica. En éstos últimos predominan polímeros de condensación (polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, polimetilmetacrilato) que se tratan principalmente con despolimerización térmica, lo cual implica procesos más costosos; sin embargo en envases el material predominante es el polietileno tereftalato (PET) que admite la mayoría de los procedimientos químicos.

Si a estos residuos de envases los cuantificamos, podemos apreciar que la cantidad de toneladas anuales que se reciclan mantienen una tendencia creciente a pesar del caída del 29% que han sufrido los envases industriales a partir de 2007 producto de la disminución en la actividad industrial (Figura 1.29); sin embargo los envases domiciliarios reciclados se ven incrementados en poco más del 6%.

Analizando las tasas de reciclado mecánico de envases en igual período de tiempo, se puede ver el incremento que se ha producido, especialmente en los últimos años del S.XX, incrementando un 84% la tasa en los últimos 10 años (de 14.4% a 26.5%), y manteniendo los valores por encima de las exigencias legales planteadas por la Directiva Europea y las Leyes nacionales (Figura 1.30).

Figura 1.29 - Evolución del reciclado de envases plásticos en España.  
\*Elaboración propia. Fuente: Informes Cicloplast. 2009

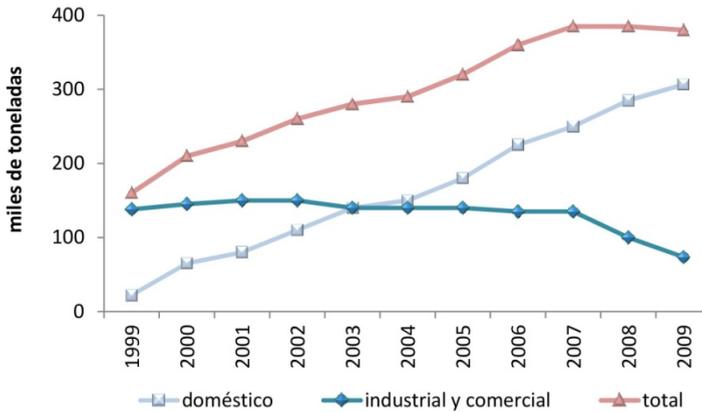
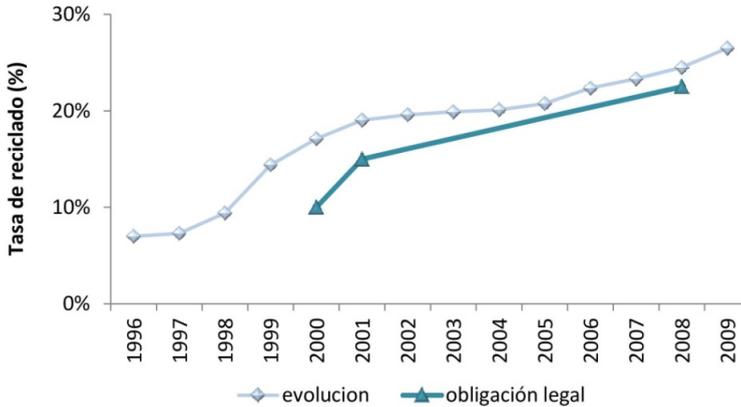


Figura 1.30 - Evolución de las tasas de reciclaje de envases plásticos en España.  
\*Elaboración propia. Fuente: Informes Cicloplast. 2009



En el ámbito de los países de América Latina y el Caribe, como se mencionó anteriormente, el reciclaje formal, en plantas de separación, es casi inexistente, predominando el reciclaje informal del cual no se pueden establecer cantidades recicladas [10].

En 2010 los valores mexicanos de exportación de residuos plásticos de polietileno tereftalato (PET) a China, provenientes de residuos post-consumo de envases, eran de un 85% de los computables, lo cual nos muestra una vez más que los procesos de

reciclaje no estaban lo suficientemente inmersos en estas sociedades. México solamente reciclaba el 15%, vendiendo el resto a los países asiáticos donde se emplea, entre otros, para la producción de fibras textiles que luego regresarán al mercado mexicano en forma de prendas de vestir.

Según declaraciones realizadas en diciembre de 2010 por el presidente de la Asociación Nacional de Industriales del Plástico (ANIPAC), Eduardo Martínez, esto se producía porque “los industriales no tienen acceso a los desechos sólidos municipales y a la falta de una cultura de separación de la basura” [23, 24].

El actual presidente de ANIPAC, Luis Gerardo Álvarez Espinoza, ha planteado este año a misma problemática al hacer hincapié en la necesidad de incrementar la industria del reciclaje en su país, no solo desde el punto de vista de incrementar fuentes laborales sino, fundamentalmente por el aporte al medio ambiente [25].

Aún no comprendidos en las estadísticas, por ser un residuo de reciente aparición, dentro de los plásticos encontramos los procedentes de los servicios de telecomunicaciones. La fibra óptica es un residuo incipiente, no tanto por el agotamiento de su vida útil sino por los avances en las telecomunicaciones que exigen conductores con mejores prestaciones o que, dada su mejor eficiencia, ocupen menos espacio.

El cableado de cobre, en algunas prestaciones, forma parte del pasado y han sido reemplazados por materiales más eficientes y livianos como la Fibra Óptica. Pero actualmente, los primeros tendidos de esta fibra, que se realizaron hace décadas, ya necesitan ser reemplazados en busca de optimizar la transmisión de las distintas señales existentes.

De la retirada de estas líneas, y los sobrantes de las instalaciones, se obtiene un gran volumen de Fibra Óptica en sí mismo e igual metraje lineal de la cubierta de protección exterior realizada en un material termoplástico de alto módulo de Young, (como puede ser polietileno de baja densidad o un compuesto de policloruro de vinilo especial) que tienen como destino final el vertedero dado que su bajo costo no justifica el reciclaje del material para igual fin; incluso existen empresas de telecomunicaciones europeas que en el momento de renovar sus instalaciones optan por hacer el nuevo tendido sin retirar la existente, en el caso de que las canalizaciones les permitan dejar ambos.

Por otra parte, el Centro Tecnológico Gaiker (Zamudio, España) plantea en su web que con el proyecto L-Fire (Long Fibre Recycling), subvencionado por la Comisión Europea, han logrado desarrollar el proceso completo de reciclaje de fibra óptica, capaz de resolver problemas como la manipulación de cables de gran longitud y la separación de mezclas complejas de metales y plásticos, pero no explicita que nuevos elementos se producen con estos materiales reciclados [26].

Este centro tecnológico plantea que han logrado un método de separación de todos los componentes del cable de la fibra óptica: acoples metálicos, funda exterior termoplástica, fibras de aramida intermedias y fibra óptica en sí misma que es el núcleo interior como se puede ver en el Capítulo 3, punto 3.1.6.1 *Residuos - Servicios de telecomunicaciones*. El proyecto en sí mismo no incluye otra etapa, pero se puede ver que las PYMES participantes del mismo están relacionadas con la fabricación o reciclaje de esos elementos.

Eurometal Recycling, una de las PYMES participantes, plantea en su página web que *“ha desarrollado un proceso industrial de separación hidrociclónica para el reciclado de mezclas complejas de plásticos procedentes del tratamiento de cable eléctrico, logrando la reciclabilidad para su reutilización de los residuos plásticos que hasta el momento no eran recuperados y tenían como destino final el vertedero”* [27].

Dado que la funda exterior de los cables de fibra óptica son de igual material que los de cableado eléctrico entendemos que esta empresa es el destino final de esa parte de los materiales obtenidos. Luego de la separación de distintos plásticos, y del metal que contienen estas cubiertas, los productos que ofrece esta empresa al mercado son:

- **“PVC flexible** procedente de cubiertas de cables. Material reciclado de alta calidad, libre de contaminación metálica. Formato triturado de 1-4 mm y colores mixtos / negro. Apto para ser procesado por extrusión o inyección”.
- **“Polietileno de baja densidad** procedente de cubiertas de cables. Material reciclado de alta calidad, libre de contaminación metálica o de PVC. Formato triturado de 1-4 mm y colores mixtos. Apto para ser procesado por extrusión o inyección”.
- **“Polietileno reticulado** procedente de cubiertas de cables. Material con gran poder calorífico: hasta 42 MJ/Kg. Libre de contaminación metálica o de PVC. Formato triturado de 1-4 mm. Indicado para su utilización como combustible alternativo”.

Por lo tanto, los productos elaborados por esta empresa son aún materia prima para la producción de nuevos elementos aún no especificados.

Para finalizar, en la Tabla 1.1, se presenta el sistema de numeración de plásticos que lo identifica para su reciclaje. Este número no corresponde con una mayor o menor dificultad de reprocesado sino simplemente relaciona el símbolo con un tipo de plástico para que pueda ser seleccionado rápidamente dentro de la cadena de reciclaje del mismo. En la misma se relacionan estos plásticos con los usos habituales.

Tabla 1.1 - Sistema de Numeración de Plásticos.

símbolo	Descripción y usos habituales
	<b>Polietilén Tereftalato (PET)</b> Envases de agua, refresco, aceite comestible, limpiadores. En textiles.
	<b>Polietileno de Alta Densidad (HDPE)</b> Envases de detergente para ropa, leche y jugo, champú.
	<b>Policloruro de vinilo (PVC)</b> Tubos de plástico, plástico de embalar, contenedores de alimentos.
	<b>Polietileno de Baja Densidad (LDPE)</b> Películas de embalaje, bolsas, envoltorios plásticos.
	<b>Polipropileno (PP)</b> pajitas para beber, botes de yogur, algunas botellas como las de jarabe, tubos de desagüe y abastecimiento, perfiles.
	<b>Poliestireno (PS)</b> Contenedores de comida para llevar, protección de electrodomésticos y equipos electrónicos, aislantes.
	<b>Otros (generalmente mezcla de resinas)</b> Contenedores de alimentos, biberones, botellas de agua para deporte. Los plásticos biodegradables también pueden ser etiquetados con 7.

### 1.3 Matrices cementicias fibroreforzadas

Los materiales fibroreforzados poseen formas de trabajo que responden a sus dos componentes principales.

Por una lado las características de la matriz a fibroreforzar, por otro las características de la fibra a emplear y, quizás el más importante, la forma de trabajo conjunto entre ambos materiales. Esto implicará conocer, no solo resistencias y deformaciones individuales y conjuntas, sino, fundamentalmente, el tipo y grado de adherencia entre ambos para que se comporten como un nuevo material.

Por este motivo, a cada compuesto, a cada relación fibra/matriz corresponde un análisis particular, con semejanzas a otras relaciones pero no igualables en su totalidad.

Una misma matriz interactúa de distinta forma con fibras que tengan diferencias en sus características físicas y/o mecánicas. Lo mismo ocurre con las fibras, un mismo tipo presentará, en mayor o menor medida, distinta respuesta en función de la matriz a la que fibro-refuerce.

En lo referente a este trabajo la matriz a emplear es cementicia y las fibras, provenientes de residuos post-consumo, son sintéticas (poliméricas) por lo cual se hará énfasis en estos dos materiales, en cuanto a sus características particulares como a la formulación del material compuesto.

### 1.3.1 Matriz Cementicia

Uno de los elementos constituyentes, y fundamentales, de los compuestos fibroreforzados es la matriz empleada dado que con ella se producirá la interacción de las fibras.

Siendo la matriz cementicia la pasta conformada por un conglomerante hidráulico y agua, los componentes de estos dos elementos y las reacciones que se producen en el proceso de fraguado serán quienes la caractericen.

El conglomerante hidráulico generalmente empleado en la construcción es el cemento portland y sus derivados, por estar conformados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, minerales muy abundantes en la naturaleza de precio relativamente bajo frente a otros cementos, y tener propiedades adecuadas para los requisitos necesarios [28].

Los cementos de altos hornos, los puzolánicos y los compuestos también pertenecen a este tipo de conglomerante, sin embargo no han sido empleados como tal en este trabajo.

El cemento portland se forma, básicamente, por la molienda conjunta de una mezcla de caliza y arcilla cocida, denominado "clinker" y de un material regulador de fraguado que generalmente es yeso dihidrato. En el clinker están presentes distintos compuestos, se trata de una mezcla de silicatos, aluminato y ferrito aluminato de calcio o sea que en el material "crudo", antes de la cocción, van a estar presentes óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio en proporciones muy concretas.

Dado que los óxidos deben estar en esas proporciones en el momento de producirlo se recurre al empleo de mezclas de sustancias que los provean e incluso recurrir a correctores como arena, minerales de hierro, etc. para aumentar el contenido de hierro o bauxita para incrementar el de alúmina.

En menores proporciones, y no tan deseables, también se encuentran los óxidos de magnesio, sodio, potasio y el trióxido de azufre.

Los límites de estos óxidos principales en la composición de un cemento portland son los indicados en la Tabla 1.2. Los cuatro primeros son los fundamentales siendo los siguientes los no tan deseables.

Tabla 1.2 - Composición en óxidos de un cemento portland  
\*Elaboración propia. Fuente: "Hormigón" M. Fernández Cánovas[28]

nombre	composición	símbolo	contenido (%)
<b>Óxido de calcio</b>	CaO	C	60 - 67
<b>Óxido de silicio</b>	SiO <sub>2</sub>	S	17 - 25
<b>Alúmina</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3 - 8
<b>Óxido de hierro</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	0,5 – 6,0
<b>Óxido de magnesio</b>	MgO	M	0,1 – 4,0
<b>Óxidos de sodio y potasio</b>	Na <sub>2</sub> O y K <sub>2</sub> O	N	0,4 – 1,3
<b>Trióxido de azufre</b>	SO <sub>3</sub>		0,1 – 2,5

Formados por la combinación de dos o más de estos óxidos principales, se encuentran como minerales principales del clinker los que figuran en la Tabla 1.3. Se encuentran mayoritariamente en estado cristalino aunque entre un 2% y 12% se encuentran en fase amorfa.

Tabla 1.3 - Componentes principales del clinker  
\*Elaboración propia. Fuente: "Hormigón" M. Fernández Cánovas[28]

nombre	nombre del mineral	composición	fórmula abreviada
<b>Silicato tricálcico</b>	Alita	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
<b>Silicato bicálcico</b>	Belita	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
<b>Aluminato tricálcico</b>		3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
<b>Ferrito aluminato tetracálcico</b>	Celita	4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
<b>Ferrito bicálcico</b>		2CaO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> F

De éstos, los silicatos forman entre el 60% y el 80%, y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento. El silicato tricálcico ( $C_3S$ ) o “alita” confiere altas resistencias iniciales al cemento con una elevación posterior lenta. Por su parte, el silicato bicálcico ( $C_2S$ ) o “belita” aporta resistencias posteriores alcanzando al silicato tricálcico [28].

Por otra parte tenemos componentes secundarios que forman parte del clinker que son, fundamentalmente, el óxido de calcio libre, el óxido de magnesio y sulfatos alcalinos.

De éstos, el óxido de calcio y el óxido de magnesio libres cristalizados, al hidratarse dan lugar a productos expansivos que provocan efectos no deseados en los materiales que contienen esta matriz, por lo cual las normas limitan el contenido de óxido de magnesio en los cementos y el óxido de calcio no combinado.

Por su parte los alcalinos ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ) influyen negativamente en la durabilidad en el caso de usar esta matriz con áridos reactivos que tengan parte de sílice hidratada amorfa.

También se encuentra limitado en los cementos el contenido de trióxido de azufre ( $SO_3$ ) en un 4.5% para evitar problemas de expansión.

## Adiciones

Están constituidos por materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente, que se añaden al cemento con la finalidad de mejorar alguna de las características físicas o químicas, para conferirle mejoras tanto sea desde el punto de vista resistente como desde el punto de vista de la durabilidad [29].

Se pueden añadir en el momento de producción del cemento o luego, en la preparación de la pasta, como un porcentaje de adición o sustitución del mismo. En este trabajo, como se indica en el Capítulo 3, se ha adoptado la segunda opción en la elaboración de algunas muestras.

Por otra parte, estos materiales pueden ser naturales, materiales que se encuentran en la naturaleza, o provenir de residuos sólidos. En el primer grupo, las que habitualmente,

se emplean son las puzolanas naturales volcánicas mientras que en el segundo suelen ser cenizas volantes, humo de sílice y escoria de altos hornos [28].

El empleo de estas adiciones al cemento, además de las mejoras en las propiedades del producto resultante, refiere también de aspectos medio-ambientales relacionados con la producción del mismo.

Más allá del consumo de las materias primas que se requieren para obtener este conglomerante, la emisión de CO<sub>2</sub> durante el proceso de producción es alta. Por cada tonelada de cemento que obtenemos se produce, aproximadamente, igual cantidad de este gas perteneciente al grupo GHG (greenhouse gas) donde se encuentran los causantes del cambio climático.

Según datos aportados por la Comisión III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [30], en el año 2000 la producción de cemento ocupaba el segundo lugar dentro de las fuentes generadoras de CO<sub>2</sub>, con 932 MtCO<sub>2</sub>/año, muy por encima del límite de 0.1 MtCO<sub>2</sub>/año que lo define como gran emisor. Estos valores se pueden apreciar en la Tabla 1.4, y refieren a una emisión total de 13.5 Gt CO<sub>2</sub> por año de los cuales el 60% corresponden a grandes emisores. (Mt= megatoneladas = 1 millón de toneladas, Gt=1000 Mt)

Tabla 1.4 - Perfil por actividades industriales de las grandes fuentes estacionarias de CO<sub>2</sub> en el uso de Combustibles Fósiles con emisiones de más de 0.1 Mt de CO<sub>2</sub> al año.

\*Elaboración propia. Fuente: "La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono, IPCC [30]

proceso	número de fuente	emisiones (MtCO <sub>2</sub> /año)
energía	4942	10.539
producción de cemento	1175	932
refinerías	638	798
industria siderúrgica	269	646
industria petroquímica	470	379
refinamiento de petróleo y gas	no disponible	50
otras fuentes	90	33

Según Informe de la misma Comisión publicado en 2000 [31] en base a 40 escenarios que abarcan una amplia gama de emisiones anuales e incertidumbres del futuro establecen que hasta mediados del S.XXI las emisiones tienden a subir en todos ellos aunque a diferentes velocidades. Establecen que para el 2040-2050 la emisión media de CO<sub>2</sub> podría estar sobre las 15 Gt al año.

Por este motivo, la disminución del uso de cemento con el empleo de adiciones ayuda a conservar los recursos naturales y puede ayudar evitar el daño medioambiental causado por estas emisiones. A continuación se analizan, entre otras, las adiciones empleadas en este trabajo.

### Puzolanas

La Norma Une-EN 197-1:2000 [32] define a estas adiciones como *“sustancias naturales de composición silíceo o silico-aluminosa o combinación de ambas”*... que *“molidas y en presencia de agua reaccionan, a temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio [Ca(OH)<sub>2</sub>] disuelto para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio, capaces de desarrollar resistencia”*.

Especifica que deben estar compuestas principalmente por dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) reactivos, así como de pequeñas cantidades de óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y otros óxidos.

Esta misma norma clasifica en dos tipos: *“puzolana natural (P)”* y *“puzolana natural calcinada (Q)”*. Las primeras son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias mientras que las segundas son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias, activadas por tratamiento térmico.

El término actividad puzolánica incluirá dos parámetros, la cantidad de hidróxido cálcico combinado con la puzolana y la velocidad a la cual se ha consumido dicho hidróxido cálcico. Ambos factores dependerán de la naturaleza de las puzolanas y más concretamente de la calidad y cantidad de las fases activas [29].

Estos materiales naturales no han sido empleados en esta etapa del trabajo dadas las premisas planteadas en el Capítulo 2 – Objetivos.

### Ceniza Volante (FA "*fly ash*")

Es un residuo sólido, subproducto de la combustión del carbón en las centrales térmicas. Procedente de la combustión de carbón pulverizado en los hogares de estas centrales, es arrastrado por los gases y recuperado por precipitación electrostática o por captación mecánica, siendo éste el único procedimiento válido para que sean consideradas como tal [28].

Sus partículas micro esféricas, tienen un diámetro medio entre 1  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ . Suele estar compuesta de pocas fases minerales; normalmente presentes el cuarzo, la mullita, hematites y la magnetita, aunque su composición es muy variable y el contenido de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) puede variar entre 34 y 62%.

Pueden ser de naturaleza silícea (V) o calcárea (W). Las silíceas tienen propiedades puzolánicas mientras las calcáreas, además, pueden tener propiedades hidráulicas.

Establecidas sus características por la Norma UNE-EN 197-1:2000 mencionada anteriormente, su pérdida por calcinación, determinada según Norma UNE-EN 197-2:2000 [33], con un tiempo de calcinación de 1 h, no excederá el 5% en masa.

### Residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico (FCC "*fluid catalytic cracking*")

El craqueo (o cracking) constituye el proceso básico empleado para aumentar el rendimiento y la calidad de la gasolina. En dicho proceso, las fracciones de elevado punto de ebullición de la destilación primaria del crudo se calientan a alta temperatura, con o sin catalizador.

En este craqueo, denominado también desintegración, se producen roturas de enlace carbono-hidrógeno, uno de carbono o hidrógeno con un átomo de azufre o nitrógeno, o uno carbono-carbono [34].

Las sustancias empleadas como catalizadores en los últimos años son generalmente de naturaleza cristalina, por lo cual a veces se los denomina catalizadores zeolíticos por ser silicatos modificados de alúmina hidratados. Estos son más selectivos, en la producción de gasolina, comparados con los anteriores que eran amorfos, y generalmente están diseñados para que minimicen la emisión de partículas a la atmósfera [29, 35].

El catalizador gastado se va retirando y regenerado incluyéndolo nuevamente en el sistema hasta el momento en que ya no es efectivo. En ese momento, es retirado totalmente del sistema de producción y se convierte en un residuo industrial al cual se le puede reciclar como adición del cemento, dado que su disposición final se realiza en vertederos.

Básicamente es un material sílico-aluminoso que presenta partículas esféricas y esferoides con diámetros medios de 80  $\mu\text{m}$ , en su aspecto original, llegando a 20  $\mu\text{m}$  una vez molido y no conservando su forma original.

#### Ceniza de Cáscara de Arroz (RHA "*rice husk ash*")

Este es un material de desecho en muchos países con las problemáticas de contaminación y destino final correspondientes. El esfuerzo por realizar esta quema en forma controlada permite ahorrar energía y recursos además de captar el residuo para ser empleado como material de construcción; cuando esa quema se realiza por combustión descontrolada el material presenta pocas propiedades puzolánicas.

Sin embargo, si la quema se realiza en atmósfera y temperatura controlada es un material altamente puzolánico, su uso es apto para el reemplazo del cemento portland [36]. Contiene un alto porcentaje de óxido de silicio de elevada pureza de tipo amorfo y su reactividad con el hidróxido cálcico depende de esta cantidad así como de la superficie específica de sus partículas.

Las ventajas que se obtienen con su empleo es la mejora en la resistencia a la compresión, modificación de la absorción con una disminución de la permeabilidad de los materiales con matriz cementicia resultantes, que conlleva un aumento de la durabilidad [29, 37].

#### Ceniza de Lodos de Depuradora (SSA "*sewage sludge ash*")

Estas cenizas provienen de la incineración de los lodos de depuradoras de aguas residuales, en donde los residuos orgánicos son descompuestos, obteniéndose un 10% de su volumen original. Su empleo en materiales de construcción favorece su disposición final que originariamente se realizaba en vertederos controlados.

Estudios realizados con esta adición muestran que mejora en la resistencia a compresión desarrollada por los morteros de cemento Portland y estabilidad de volumen de las mezclas [38].

La forma no esférica de sus partículas tiene una influencia negativa en la trabajabilidad de material adicionado [39] y dado que estas cenizas son ricas en azufre ( $SO_3 > 10\%$ ) hay que tener especial atención en el estudio de la degradación del hormigón por ataques de sulfatos [40].

### Residuo Cerámico (CW "*ceramic waste*")

Desechos sólidos de cerámica cocida podrían ser reutilizados en la producción de nuevos cerámicos pero su alto costo de reprocesado hace que su disposición en vertederos controlados sea más económico para las empresas [41]

Arcillas calcinadas y molidas a una finura adecuada pueden ser empleadas como puzolanas, no así el material en su estado crudo. La realidad es que se ha usado como aditivo puzolánico desde tiempos antiguos

En las investigación realizada por A. E. Lavat et al [42] se ha determinado que en los residuos cerámicos existe cuarzo cristalino, óxido de hierro y feldespato, los cuales se encontraban presentes en la materia prima como estructuras cristalinas.

Este estudio confirma, además, que los residuos de cerámicos calcinados alrededor 900 °C y con una granulometría adecuada puede ser muy eficaz como puzolanas.

### 1.3.2 Fibras

Como se mencionó anteriormente en el ítem 1.1, actualmente existe una gran variedad de fibras que se emplean en el campo de la Ingeniería Civil, particularmente, para el fibrorefuerzo de matrices cementicias.

La elección de una u otra fibra estará en función de las prestaciones que se busquen en el material compuesto, ya que éstas presentan distintas características físico-mecánicas variando su efectividad así como su costo. Las características de las fibras frecuentemente empleadas se puede observar en la Tabla 1.5

Tabla 1.5 - Características físicas y mecánicas de fibras  
\*Elaboración propia. Fuente: Arnon Bentur y Sidney Mindess [8]

<b>fibra</b>	<b>diámetro (μm)</b>	<b>módulo de elasticidad (Gpa)</b>	<b>resistencia a tracción (Gpa)</b>	<b>elongación en rotura (%)</b>
<b>acero</b>	5-500	200	0,5-2,0	0,5-3,5
<b>acrílico</b>	18	14-19,5	0,4-1,0	3
<b>aramida (kevlar)</b>	10-12	63-120	2,3-3,5	2-4,5
<b>asbestos</b>	0,02-0,4	164-196	3,1-3,5	2,0-3,0
<b>carbón</b>	8-9	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
<b>celulosa</b>	-----	10	0,3-0,5	-----
<b>madera</b>	-----	71,0	0,9	-----
<b>nylon</b>	23-400	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
<b>polietileno</b>	25-1000	5	0,08-0,60	3-100
<b>polipropileno</b>	20-400	3,5-10	0,45-0,76	15-25
<b>sisal</b>	10-50	-----	0,8	3
<b>vidrio</b>	9-15	70-80	2-4	2-3,5
<b>matriz cementicia</b>	-----	10-45	0,003-0,007	0,02

Además de las diferencias de comportamiento que existe entre los distintos materiales, las variaciones entre las fibras de un mismo material amplían el abanico de posibilidades.

Las investigaciones realizadas sobre el trabajo conjunto con la matriz han llevado a buscar la mejora de prestaciones mediante variaciones en la propia fibra y/o en los procedimientos de producción del material compuesto. En cuanto a la fibra, se encuentran variaciones en cuanto a su disposición, forma o tratamiento superficial. En cuanto a la producción del material compuesto la búsqueda de compatibilidad entre las características en estado fresco y las prestaciones requeridas en estado endurecido, plantea, en la mayoría de los casos, una discordancia. Generalmente, más fibras de

menor tamaño nos garantizan una mejor distribución de tensiones en el material compuesto, pero nos dificultan más el proceso de mezclado con la matriz.

Para compatibilizar estos dos requisitos han surgido alternativas que van desde tratamientos superficiales de fibras hasta el uso de aditivos en la matriz, permitiendo así una mejor dispersión de las fibras en el momento de producción del material compuesto.

Desde el punto de vista de la disposición de las fibras en la matriz vemos que la primera gran división que podemos realizar es en cuanto a las características de continuidad o no de esas fibras. El empleo de fibras continuas, como mallas o películas dispuestas dentro de la matriz se encuentran fuera del estudio de este trabajo por lo que nos centraremos en aquellas fibras que se disponen en forma discontinua. (Figuras 1.31 y 1.32)

Figura 1.31 - Distribución continua de fibras: en barras (izquierda), en malla (derecha)  
Autora: Ma. Esther Fernández (agosto de 2012)

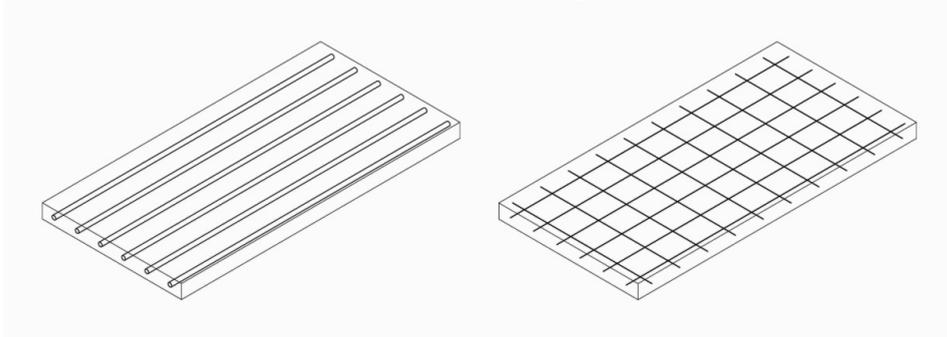
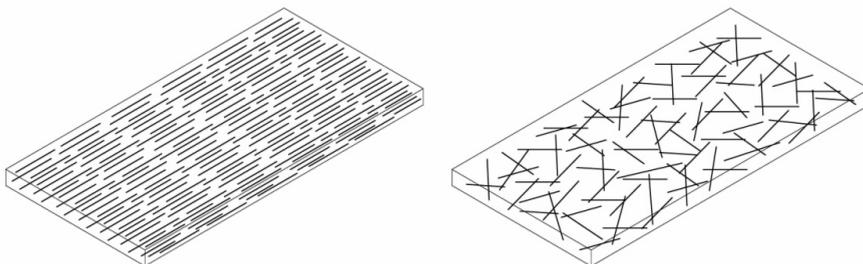


Figura 1.32 - Distribución discontinua de fibras: alineadas (izquierda), dispersas (derecha).  
Autora: Ma. Esther Fernández (agosto de 2012)



La segunda clasificación que podemos establecer, en cuanto a la disposición de esas fibras discontinuas, se centra en el proceso de producción del material compuesto, bien se realiza una alineación de las mismas, según el eje principal de la pieza, o bien si quedan distribuidas al azar.

La distribución de fibras alineadas se asocia, generalmente, a la producción de materiales compuestos con matrices que permiten emplear procedimientos de extrusión o similar, matrices poliméricas por ejemplo. En esos casos, tanto las dimensiones de estos elementos como el sistema de elaboración, permiten disponer las fibras de forma orientada (Figura 1.32). En matrices cementicias la distribución al azar es la más utilizada; las características del proceso constructivo empleado en estos materiales es afín con esta forma de disponer las fibras.

Esta disposición discontinua y al azar hace que estas fibras no sean tan eficientes para resistir las tracciones como las barras de acero, pero al estar más distribuidas en la sección permiten controlar mejor las tensiones de retracción.

Las diferencias en la concentración de tensiones con las barras de acero hacen que el uso de fibras sea más adecuado para algunos elementos constructivos. Particularmente en elementos de poco espesor donde las barras no tienen el espacio suficiente (placas, elementos de cubierta, etc.) o en aquellos donde existan tensiones locales muy elevadas como por ejemplo pilotes.

Como refuerzo secundario, el fibrorefuerzo se emplea en elementos constructivos que, teniendo la resistencia de esfuerzos de tracción resuelto con barras de acero, se desee controlar la fisuración que producen los cambios de temperatura o humedad. Como ejemplo podemos mencionar su empleo en losas y pavimentos, proporcionando ductilidad después de que se produce la primera fisura pero con tensiones menores a las que corresponden a esa sección.

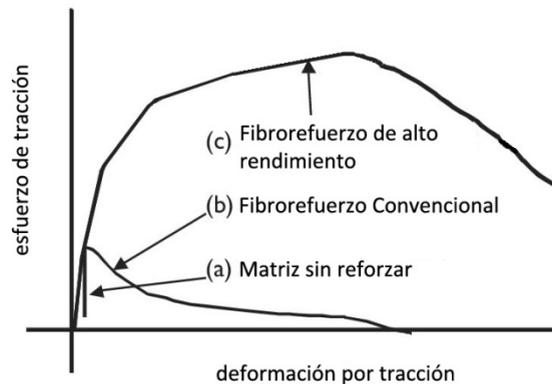
Bentur y Mindess [8] plantean que esta forma de trabajo es la que se denomina fibrorefuerzo convencional y que las fibras en estas situaciones, donde existen barras de acero, no sustituyen su función sino que la complementan (Figura 1.33)

Cuando actúan de esta manera, complementando a las barras de acero, las fibras no son empleadas para mejorar la resistencia a tracción del compuesto, aunque a veces igual lo

hacen en una pequeña magnitud, sino que se busca mejorar el comportamiento de la material después de que la matriz fisura. Mejora así la absorción de energía del material, obteniéndose mayor resistencia al impacto, a la abrasión y a la fatiga.

Figura 1.33 - Curvas tensión/deformación de una matriz, con un fibrorefuerzo convencional y con un fibrorefuerzo de alto rendimiento.

\*Adaptación del Libro: "Fiber Reinforced cementitious Composites" Bentur y Mindless [8]



Dependiendo de la matriz, tipo y proporción de fibra que se emplee se logrará que el comportamiento del compuesto sea de una u otra forma.

De los estudios realizados desde mediados del S.XX se han obtenido resultados favorables en el empleo de algunas fibras como fibrorefuerzo de matrices cementicias, actualmente en uso para la construcción de distintos elementos. Igualmente se continúa profundizando la investigación sobre el comportamiento del nuevo material compuesto.

Independientemente de la clasificación de los tipos de fibra que pueda realizarse, a continuación se desarrollan, brevemente, las principalmente empleadas para el fibrorefuerzo de matrices cementicias en Ingeniería Civil.

### 1.3.2.1 Fibras de asbesto

De estas fibras ya se ha hecho referencia, principalmente por la prohibición de su uso en la gran mayoría de países, desarrollados y en vías de desarrollo, por ser perjudicial para la salud, por ser cancerígeno.

Dado que aún existen países permisivos en su empleo, se continúan realizando investigaciones para adecuarla a matrices contemporáneas, pero no así en cuanto a impedir que sean nocivas para quienes las manipulan al fabricar estos elementos.

Aunque para este trabajo el compuesto amianto-cemento no tiene interés práctico, las investigaciones que se han realizado sobre el compuesto son una base para las fibras actuales que tienen similares métodos de producción u otros pero cuyas características, como fibra, sean similares al asbesto.

Se debe reconocer, que a pesar de ser un material actualmente falto de interés, los resultados obtenidos con estas fibras debieron su éxito a la compatibilidad fibra/matriz cementicia, por su alto módulo de elasticidad y resistencia, además de permitir una dispersión efectiva de volúmenes relativamente grandes de fibra, incluso mayores al 10% [8]. Estos datos pueden servir de base en el momento de proceder al análisis de fibras naturales que puedan cumplir la misma función dentro del compuesto.

### 1.3.2.2 Fibras metálicas.

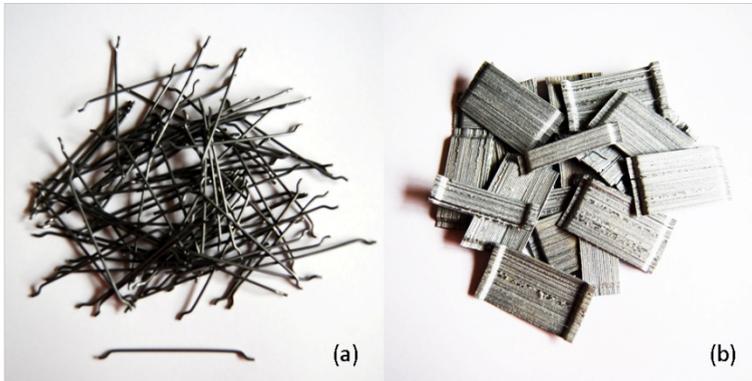
Como se ha mencionado anteriormente, estas fibras se empiezan a usar a mediados del S.XIX y han ido mejorando sus prestaciones con los años a causa de una continua investigación de ellas.

Esas primeras investigaciones trataban, fundamentalmente, del comportamiento del hormigón reforzado con estas fibras (SFRC "*steel fiber reinforced concrete*") más que de las fibras en sí. Luego con los años, se han ido desarrollando nuevas formas y dimensiones de las fibras para optimizar su empleo según las prestaciones requeridas.

Desde entonces ha sido la más empleada en compuestos de matriz cementicia aunque últimamente están siendo superadas por las fibras sintéticas.

Originariamente su uso era para el control de la fisuración por retracción, para evitar la armadura que se ponía para ese fin. En la actualidad, si bien se sigue empleando para ello, ha ido incorporando características resistentes de modo de reemplazar armaduras convencionales o por lo menos complementarlas en la resistencia a tracción [8], existiendo varios tipos según el uso Figura 1.34

Figura 1.34 - Fibras metálicas para hormigón: (a) sueltas, (b) en peine  
Autora: Ma. Esther Fernández (agosto de 2012)



Su forma y tamaño ha ido variando con los años logrando superar los primeros inconvenientes de mezclado con la matriz así como mejorar la adherencia con la misma.

Las características que deben cumplir desde el punto de vista de definición, especificaciones y conformidad están indicadas en la norma UNE-EN 14889-1:2008 [43].

Los usos actuales en donde encontramos estas fibras son en el fibrorefuerzo de: hormigones de altas prestaciones empleados, principalmente, en obras de carácter civil; hormigones con agregados livianos (LWC "*lightweight concrete*"); material de reparación de estructuras; materiales con necesidad de resistencia al corte, y en hormigón proyectado, fundamentalmente para su empleo en minas y obras civiles [44]

A pesar de tener tantos años de uso y existir normativa que contemple el mismo, continúan las investigaciones sobre el comportamiento del compuesto en situaciones aún no terminadas de definir como complementar el estudio del trabajo en fluencia [45], así como resistencia a impacto [46], aspectos de durabilidad, empleo en hormigones de alta resistencia [47], empleo en nudos estructurales donde la armadura principal está soldada [48] o en construcciones para zonas sísmicas [49]

### 1.3.2.3 Fibras de vidrio

En los años '50, por el éxito obtenido en refuerzo de matrices poliméricas, estas fibras se comienzan a usar con matrices cementicias. Por su bajo módulo de elasticidad no pudo

sustituir a las barras de acero, siendo sus primeras aplicaciones como mallas dentro de la matriz, con proporciones de hasta el 50%.

Como se mencionó anteriormente, una década después surge la necesidad de comenzar a sustituir al amianto y de ahí que esta fibra por años fuera su principal sustituto, empleándose en elementos de pequeño espesor con pasta o mortero, surgiendo así el GRC (*"glass fiber reinforced cement"*) [50].

Con los años se observó que el GRC realizado perdía propiedades (ductilidad y resistencia a tracción) y relacionándose este fenómeno con la degradación que sufren las fibras de vidrio tipo E en su interacción con el cemento. Surgen así las fibras de vidrio AR (*"alkali-resistant"*) al modificar la base silícea de su composición por el empleo de circonio [51, 52].

El material compuesto resultante es muy versátil por lo que permite su aplicación en un gran número de elementos: paneles prefabricados lisos, cenefas, paneles de fachadas con formas complejas, etc.

Sus características y textura le permiten ser compatible con el hormigón, por lo cual en obras de ampliaciones y reparaciones de fachadas se ha empleado. Por su flexibilidad y ligereza es aplicable también en edificios de formas singulares o complejas.

Las normas UNE contemplan el uso de estas fibras en los elementos prefabricados de hormigón en las partes de la Norma UNE-EN 1170 [53], así como en las Norma UNE-EN 15191:2011 [54] y UNE-EN 15422:2009 [55].

#### 1.3.2.4 Fibras Poliméricas

Estas fibras sintéticas existen en dos tipos de polímeros: las poliolefinas o polialquenos, que se obtiene de la polimerización de olefinas (alquenos) y las poliamidas que contienen enlaces de amida.

Por otra parte, para aumentar la fuerza del material compuesto las fibras deberían tener un módulo de elasticidad mayor que la matriz, y éste en matrices cementicias oscila entre 15 y 40 GPa. Estos valores son difíciles de superar por fibras sintéticas por lo que podemos clasificar las mismas en las que tienen bajo o alto módulo de elasticidad [8].

Estas fibras están contempladas en la normativa española a través de la Norma UNE-EN 14889-2:2008 [56] en la cual se plantean, principalmente, los requisitos que deben cumplir así como la evaluación de la conformidad.

En función del trabajo realizado en esta investigación profundizaremos en aquellas fibras con características similares a las empleadas, con bajo módulo elástico.

## Fibras de bajo módulo

### Fibras de Polipropileno (PP)

Las fibras de polipropileno son las más conocidas y pertenecen al grupo de las fibras sintéticas con bajo módulo elástico. Son las más difundidas a nivel internacional por empresas que las comercializan y que tienen sede en un número importante de países [57].

Se fabrican por la polimerización de propileno en variedad de formas y tamaños según las prestaciones que se requieran [8, 58].

La principal ventaja de estas fibras es su resistencia al medio alcalino que constituye la matriz cementicia [59], además de tener un bajo coste y un punto de fusión relativamente alto, 165 °C.

Las desventajas son que tienen poca resistencia al fuego, con sensibles a la luz solar, tiene un bajo módulo de elasticidad y poca adherencia a la matriz.

Para corregir estas condiciones se han desarrollado diferentes tipos cambiando textura superficial para mejorar el defecto de adherencia y con recubrimientos superficiales para que sean menos sensibles a las altas temperaturas.

Desde el punto de vista de las diferentes características mecánicas entre fibras y matriz se demuestra que la adición de fibras de polipropileno mejora las resistencias mecánicas del hormigón, se disminuye el efecto tamaño (de probeta), hay un aumento de energía de fractura específica obteniéndose hormigones más dúctiles [60].

El empleo de fibras cortas de polipropileno en hormigones autocompactables mostró elevados índices de tenacidad y valores altos de módulo de rotura a flexión [61]

### Fibras Acrílicas

En sus comienzos estas fibras eran iguales a las empleadas en la industria textil, con resistencias a tracción en el orden de los 200-400 MPa.

En porcentajes económicamente viables no mejoran las resistencias a flexotracción o a tracción de los hormigones, mejoran sensiblemente las resistencias a impacto así como disminuyen la retracción evitando que se formen microfisuras [62].

Por otra parte tienen una gran adherencia con las matrices cementicias pero presentan un proceso de degradación superficial en medios fuertemente básicos [63].

Para darle mayor aplicación a este material se han desarrollado fibras acrílicas de alta resistencia con un módulo de elasticidad similar al de la matriz, con formas de filamentos cortos o en tejido.

Comparadas con las fibras textiles convencionales se puede apreciar el aumento de resistencia y módulo de elasticidad, acompañadas por una reducción de elongación final pero todavía superior a la elongación de la matriz [8].

### Fibras de Nylon

Empleadas con frecuencia para sustituir las fibras de polipropileno, presentan mayor resistencia que éstas y un módulo elástico similar (Tabla 1.5).

La característica más importante a tener en cuenta es que son hidrofílicas, con lo que pueden absorber aproximadamente el 4,5% de agua, dato importante si se emplean un alto porcentaje de fibra.

Al igual que el polipropileno, el nylon es un material estable en el medio alcalino que produce la matriz de cemento.

En su empleo como fibrorefuerzo de hormigones se encontró que presenta mayores prestaciones mecánicas que al usar fibras de polipropileno así como una mejor

distribución de las fibras. Respecto al mismo hormigón sin fibras se encontraron mejoras en las resistencia a primera fisura pero menor que con las fibras de polipropileno [64].

### Fibras de Polietileno

Estas fibras presentan un gran interés por la facilidad que tienen para dispersarse en la matriz convencional.

La textura superficial mejora su adherencia lo cual hace que trabaje bien con la matriz, sobre todo aquellas que tienen módulo elástico similar a ella.

Se utilizan tanto como fibras cortas o en forma de malla continua. Las fibras cortas en proporciones de hasta el 4% muestran mejoras en la resistencia posterior a la primera fisura de la matriz, siendo eficientes en el control de la fisuración. Como fibras continuas presentan mejores prestaciones que las fibras de polipropileno por presentar mayor módulo elástico [8].

Con tratamientos de plasma se ha logrado mejorar la adherencia y la dureza superficial de las mismas y al tener alto módulo se las podría utilizar como refuerzo primario, confiriéndole la capacidad resistente de tracciones.

Actualmente hay fibras de polietileno corrugadas con igual forma que las metálicas pero con la ventaja de que su menor peso específico, permite consumir una cuarta parte del material. [65]

### Fibras de poliolefina

Estas fibras, producidas en forma de monofilamento, presentan una buena adherencia a la matriz por presencia de rugosidades en su superficie.

Tienen los mismos efectos que las fibras de polipropileno presentando además una considerable mejora en las propiedades de fatiga del material compuesto.

En los ensayos de impacto, hormigón reforzado con fibras de poliolefina, han mejorado considerablemente con el aumento del volumen de fibra. Las muestras con 1,5% de fibra

alcanzaron valores iguales a los reforzados con acero, lo cual presenta una alternativa de uso para este material. [66]

## Fibras de Alto Módulo

Como se mencionó anteriormente, este tipo de fibras no se corresponden con las empleadas en la investigación por lo cual se expondrán las características generales sin entrar en el detalle de cada una.

Fibras de Carbono o de Aramida (Kevlar) son las más conocidas dentro de este grupo. Ambas están conformadas por múltiples filamentos que trabajan en conjunto, teniendo valores altos de resistencia y módulo elástico.

La diferencia fundamental entre ellas es que las fibras de carbono presentan una rotura frágil mientras que las fibras de Aramida presentan una rotura dúctil, lo cual puede hacer que una sea más recomendable para unos usos que la otra [8]. Por otra parte, las fibras de Aramida (Kevlar), ven afectada su durabilidad con temperaturas mayores a 160 °C lo que exige un estudio especial en condiciones de fuego.

Otra aplicación que se le da a estas fibras, por sus altas prestaciones resistentes, son dispuestas en bandas pegadas con resinas epoxi para la reparación de estructuras.

En este grupo también se encuentran las fibras acrílicas de alto módulo mencionadas anteriormente, en el ítem Fibras Acrílicas, junto a las de bajo módulo.

### 1.3.2.5 Fibras Naturales

Las fibras de origen vegetal se comenzaron a estudiar hace ya algunos años. Muchas de las investigaciones sobre su uso en fibrorefuerzo de matrices cementicias han sido originadas por la gran disponibilidad y altas resistencias de las mismas.

Esa gran disponibilidad combinado con procesos de producción simples hacen que estas fibras sean potencialmente adecuadas para la aplicación en construcciones de bajo coste económico y medioambiental, por lo cual las miradas en cuanto a su uso se centran, fundamentalmente, hacia países subdesarrollados o en vías de desarrollo [67].

La mayor dificultad de este tipo de fibras es su durabilidad en medios alcalinos, particularmente en la matriz cementicia [68].

En cuanto a la resistencia a la fractura, se aprecia que el fibrorefuerzo realizado con estas fibras proporciona mejoras en estos valores [69] así como un incremento en la energía absorbida que justificaría su uso para elementos que requirieran resistencia al impacto [70].

### 1.3.3 Interfaz

La interfaz es una capa entre dos diferentes fases de un material compuesto. La estructura y composición de esa capa, conocida como la zona de transición interfacial (ITZ *"interfacial transition zone"*), depende de las propiedades de los materiales concurrentes en ella y de las condiciones de la mezcla, hidratación, endurecimiento y envejecimiento de los mismos [71].

En las matrices cementicias fibroreforzadas las tensiones son transmitidas de una fase a otra (de la matriz a la fibra y viceversa) a través de la interfaz y esa zona de transición interfacial (ITZ) puede ser más fuerte o más débil y tiene una estructura diferente a la matriz "pura", que está fuera de esa zona.

La naturaleza y tamaño de esta zona ITZ depende del tipo de fibra y de la tecnología aplicada en la producción y puede, incluso, variar con el tiempo [8].

Las características de esta zona deben tenerse en cuenta, sobre todo, en lo que refiere a su influencia en la adherencia de la fibra con la matriz y en el efecto de puente que las fibras hacen cosiendo las fisuras, con su posterior efecto en la resistencia del compuesto.

Uno de los parámetros que se estudian habitualmente, cuando se analiza una matriz cementicia fibroreforzada, es la resistencia química de las fibras en medio alcalinos que simulan el medio al que estarán expuestas. Esto es válido, las fibras no deben degradarse por este motivo, deben ser químicamente estables, pero esos estudios carecen del análisis de cómo afecta la presencia de la fibra en la composición de la matriz, en esa interfaz.

Tomando en consideración que la matriz cementicia continúa activa, incluso después de los 28 primeros días de hidratación, y que esto puede no ser importante en cuanto a ella en sí misma, no hay que perder de vista que sí puede influir en la naturaleza de la interacción mecánica entre fibra y matriz, generando cambios en el rendimiento del compuesto con el transcurso del tiempo [72].

El flujo a lo largo y a través de una interfaz es más intenso que en otras fases porque se da en una capa de densidad menor que el resto de la matriz y puede ser penetrable por gases y líquidos. Se cree que la ITZ interviene en la determinación de la permeabilidad global del material y por lo tanto influye en el comportamiento mecánico del material compuesto [71].

Chan y Li [73] en su investigación plantean que en esta zona de transición interfacial la composición de la matriz es diferente al resto de su masa en cuanto a su microestructura lo cual influye en las propiedades de adherencia. Esta zona presenta una porosidad mayor debido al flúir e ineficiente cobertura de las partículas de cemento en estado fresco. Como consecuencia de ello hay mayor formación de cristales de portlandita (CH) en esta zona.

En su trabajo con fibras de polietileno en una matriz cementicia, plantean que la adherencia interfacial madura mucho más rápido que en el resto de la matriz. Mientras en la masa el desarrollo de estas propiedades se produce entre 14 y 28 días, plantean que en la interfaz se alcanza a los 7 días.

Estudios de la interfaz realizados sobre fibras de nylon en matrices cementicias muestran que tiene un comportamiento similar ante una modificación en la matriz, haciéndola más densa con la incorporación de humo de sílice, o una modificación en la inclinación de la fibra. Se deduce de ello que las fuerzas de rozamiento, para este tipo de fibras, no son tan sensibles a los cambios como las fuerzas de adherencia [74].

La determinación cuantitativa de la influencia de la zona de transición interfacial (ITZ) para la durabilidad y propiedades mecánicas del material compuesto es fundamental, pero es difícil determinar los valores de enlace entre los dos materiales adyacentes en ella.

Si la matriz cementicia a su vez está acompañada de áridos, mortero u hormigón, la interfaz pasa a ser variable en sí misma, en función de que la fibra esté en contacto con matriz o con árido.

Esto dificulta aún más los estudios, sobre todo en cuanto a la modelización de la misma por la incertidumbre de que proporción de la fase fibra realmente está en contacto con la matriz.

Por otra parte, en la mayoría de los casos, la masa del mortero u hormigón fibroreforzado está expuesta a vibraciones que se transfieren a los áridos. Este hecho también genera una influencia en la conformación de la zona de transición interfacial que se crea en el proceso de hidratación y endurecimiento del cemento.

Por lo expuesto, la interfaz es una zona compleja y puede llegar a ser la región más débil del material compuesto cuando está en carga. En matrices cementicias que contengan áridos y se encuentren fibroreforzadas, estas zonas de transición interfacial se dan en más de una situación: pasta cementicia/árido y pasta cementicia/fibra si solamente contara con árido fino (arena). En caso de contener árido grueso existiría una tercera ITZ a estudiar.



## 1.4 Residuos sintéticos en matrices cementicias.

En este ítem se presentan antecedentes sobre el empleo de materiales sintéticos, provenientes de residuos post-consumo en matrices cementicias.

Los residuos sintéticos, como se planteó en el punto 1.2.5, han ido creciendo con los años y esta tendencia continúa. Por ello, en las últimas décadas del S.XX se comienza a investigar sobre su reciclaje. En primera instancia las investigaciones se dirigieron a una búsqueda de la optimización de los procedimientos de reciclado por reprocesamiento para producir un material de similares características. En algunos casos esto no es económica y medioambientalmente viable dado que, en el reprocesado, se consume nuevamente fuentes de energía, se emiten más gases de efecto invernadero a la atmósfera y no se obtienen materiales puros. Los plásticos se degradan en el transcurso del reprocesado y hay que incorporar material virgen para producir el nuevo producto, y en algunos casos, como en el embalaje de alimentos, no está permitido su empleo.

Dentro de las alternativas factibles para la gestión de estos materiales residuales surge su reutilización por incorporación en materiales de construcción para producir nuevos materiales.

Surgen así los trabajos dirigidos a aplicar las resinas recicladas de los residuos plásticos post-consumo en matrices poliméricas y, directamente relacionado con este trabajo, la posibilidad de emplear estos residuos poliméricos en morteros u hormigones de matriz cementicia aligerados o fibroreforzados.

El caso de su uso como agregado en morteros u hormigones, si bien no se corresponden directamente con el presente trabajo, sirven de antecedente en cuanto a la compatibilidad de ambos materiales: polímero/matriz cementicia por lo cual haremos una reseña de ellos.

A continuación, se detalla a grandes rasgos, las líneas de investigación principales que desarrollan en esas dos temáticas referidas al empleo de residuos sintéticos post-consumo en matrices cementicias: su empleo como sustituto de agregado en morteros u hormigones livianos y su empleo como fibra en matrices cementicias fibroreforzadas.

#### 1.4.1 Uso de partículas de residuos sintéticos post-consumo como agregados en matrices cementicias.

Una revisión bibliográfica sobre el uso de residuos plásticos como agregados en morteros y hormigones se publicó en abril de este año 2012 [75]. Como en él se contemplan sólo alguna de las investigaciones analizadas en la preparación del presente trabajo y realiza el análisis desde una óptica basada en objetivos distintos, se hará referencia al mismo solamente en casos puntuales, basando la información proporcionada en los trabajos originales de los grupos de investigación que se mencionan.

Asimismo, se desarrollarán los trabajos de aquellos grupos de investigación que se consideren relevantes o directamente vinculados con este trabajo, pudiéndose consultar la bibliografía según los datos proporcionados en la Tabla 1.6 para ampliar la información.

##### Grupo de investigación de T.R. Naik, país: EEUU

Este grupo conformado por **T.R. Naik y colaboradores** [76], en el año 1996 publica sobre el empleo de residuos plásticos en hormigones.

Plantean el uso de partículas provenientes de residuos post-consumo de envases de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) como sustitución de áridos en hormigón.

Los porcentajes de sustitución en peso analizados varían de 0 al 5% y a su vez emplean tres tratamientos superficiales de las partículas para mejorar la adherencia.

Tras el análisis a compresión de las muestras concluyen que:

- el tratamiento superficial que dio mayores resistencias a compresión fue el de lejía alcalina
- como era de esperar, la resistencia a la compresión disminuyó respecto al hormigón sin partículas plásticas, cuando la adición era mayor a un 0,5%.
- el porcentaje de partículas puede ser mayor si se mejora el área de adherencia para garantizar la transferencia de esfuerzos a través de ellas.

### Grupo de investigación de R. Gaggino, país: República Argentina

Este grupo, conformado por **R. Gaggino y colaboradores** [77-86], es del que presenta mayor número de referencias bibliográficas de su trabajo relacionado con esta temática.

A partir del año 2003 hasta la fecha, alternando en cada publicación el número de integrantes que lo representan, han ido promoviendo su trabajo de investigación y puesta en obra de los elementos constructivos que han elaborado llegando a obtener la patente de los mismos.

Su investigación se ha basado en desarrollar una tecnología para la elaboración de ladrillos, bloques y losetas de pasta de cemento y partículas de residuos plásticos.

Los componentes son: PET (polietileno tereftalato), procedente de envases descartables de bebidas y plásticos varios; PE (polietileno), BOPP (polipropileno biorientado) y PVC (policloruro de vinilo), procedentes de embalajes de alimentos reciclados. Los polímeros son triturados a distintos tamaños y mezclados con la pasta cementicia en proporciones matriz/plástico variables según el elemento constructivo, pero en el entorno del 30% de cemento Pórtland, en peso.

Las propiedades de estos elementos constructivos, comparadas con los materiales tradicionales que se emplean para igual fin, son:

- menor peso lo que permite disminuir costos de cimentación y transporte,

- proveen de mayor aislamiento térmico permitiendo emplear menores espesores para igual confort,
- resistencia mecánica menor pero suficiente para cerramientos no portantes en viviendas de estructura independiente.
- absorción de agua similar,
- resistentes a la acción de rayos UV y ciclos alternados de humedad,
- resistencia al fuego, clasificado como: “material combustible de muy baja propagación de llama”
- permeabilidad similar,
- resistencia acústica similar.

Con los resultados obtenidos han realizado transferencia tecnológica aplicando estos productos en construcciones de un nivel en la misma ciudad de Córdoba, Argentina [87].

### Grupo de investigación de Y-M. Choi, país: Corea del Sur

**Y-M. Choi y colaboradores** [88, 89] publican en **2005** los resultados de la investigación que llevan a cabo sustituyendo árido por partículas de PET, obtenido de residuos post-consumo, en hormigón, y a las cuales se las recubrió de escoria granulada de alto horno.

Empleando tasas de sustitución de 25, 50 y 75 % de árido fino, tras realizar ensayos de compresión y tracción indirecta, y comparando los valores con un hormigón sin sustitución, llegaron a la conclusión que:

- a los 28 días la resistencia disminuye, para una sustitución del 75% se produce una reducción del 33%,
- la densidad disminuye,
- la eficiencia estructural disminuye al aumentar el porcentaje de sustitución, con 75% de sustitución disminuyó un 21% aproximadamente.
- se mejoró la trabajabilidad,
- se amplió la zona de transición entre matriz cementicia y agregado ligero.

En **2009**, junto al canadiense M. Lachemi publican otro informe de su investigación, empleando nuevamente partículas de PET obtenidas de residuos post-consumo como agregado fino en mortero y hormigón.

En este trabajo realizan una caracterización en tres instancias: partículas de PET, mortero con agregado fino de PET, y hormigón con agregado fino de PET.

Las conclusiones obtenidas, comparando con muestras control (sin PET), fueron:

- la densidad disminuyó cerca de un 47%,
- la absorción aumentó con el aumento de la proporción de sustitución,
- la resistencia a compresión disminuyó con el aumento de la proporción de PET,
- el asentamiento aumenta proporcionalmente al aumento de la proporción de partículas de PET, probablemente por su forma redondeada y sin absorción.
- La disminución en la resistencia a compresión de hormigones con sustitución de árido fino por PET fue independiente de la relación agua/cemento empleada (0,45, 0,49 y 0,53)

### Grupo de investigación de O.Y. Marzouk, país: Francia

El trabajo presentado por **O.Y. Marzouk y colaboradores** [90] refiere a la sustitución parcial y total del volumen de arena por residuo de PET post consumo granulado.

Se evaluó la densidad aparente, características mecánicas y la relación de éstas con la microestructura del compuesto empleando microscopia electrónica de barrido (SEM). También valoraron la durabilidad con el estudio de absorción, absorción en fase gaseosa, contracción en estado saturado y medición del módulo de elasticidad. Las conclusiones obtenidas al comparar con la muestra control son:

- con sustituciones de arena, menores al 50% en volumen, por partículas de PET no se ve afectada la resistencia a compresión ni la resistencia a flexión.
- disminución de la conductividad térmica,
- mejoras en las condiciones de durabilidad.

### Otras investigaciones

Hasta la fecha existen otros grupos de investigadores que han trabajado sobre este tema. Como se puede apreciar en la Tabla 1.6 estos grupos se encuentran dispersos por el mundo y presentan variedad en las temáticas investigadas.

Tabla 1.6 - Investigaciones sobre el uso de residuos plásticos como agregados de matrices cementicias. Orden cronológico.

Equipo	referencia	pais	año	residuo	mat	% partículas
Naik et al	[76]	EEUU	1996	HDPE	H	0 - 5
Gaggino et al	[77-86]	Argentina	2003-2010	LDPE-PET	P	30 - 35
Choi et al	[88, 89]	Corea del Sur	2005/2009	PET	H	25, 50 y 75
Laukaitis	[91]	Lituania	2005	PS	P	c/p= 1:1 - 1:3
Marzouk et al	[90]	Francia	2007	PET	H	0,2 - 100
Batayneh et al	[92]	Jordania	2007	mezcla	H	5, 10, 15 y 20
Luis et al	[93]	Venezuela	2008	PET	H	5, 10 y 15
Siddique et al	[94]	India	2008	revisión	H	-----
Mounanga et al	[95]	Francia	2008	PUR	H	13,1 - 33,7
Panyakapo et al	[96]	Tailandia	2008	melamina	M	c/p= 1:0,5 a 1:4
Ismail et al	[97]	Irak	2009	PE - PS	H	10, 15 y 20
Modro et al	[98]	Brasil	2009	PET	H	10, 20, 30 y 40
Kan et al	[47, 99]	Turquía	2009	PS	H	25, 50, 75 y 100
Albano et al	[100]	Venezuela	2009	PET	H	10 y 20
Kou et al	[101]	Hong Kong	2009	PVC	H	5, 15, 30 y 45
Remadnia et al	[102]	Francia	2009	PET	M	30, 50 y 70
Alcaozoglu et al	[103, 104]	Turquía	2010-2011	PET	M	50 y 100
Hannawi et al	[105]	Francia	2010	PET - PC	M	3, 10, 20 y 50
Frigione	[106]	Italia	2010	PET	H	5
Chidiac et al	[107]	Canadá	2011	HDPE - LDPE	H	3, 6, 9 y 15
Galvao et al	[108]	Brasil	2011	LDPE - PET	H	0,5, 1, 2,5, 5 y 7,5
Ferreira et al	[109]	Portugal	2012	PET	H	7,5 y 15
Saikia et al	[75]	Portugal	2012	revisión	M/H	-----
Wang et al	[110]	China	2012	PS	M	10, 20 y 50
Widjoko et al	[111]	Indonesia	2012	PET	H asf	6

Referencias: **HDPE**=polietileno de alta densidad); **LDPE**=polietileno de baja densidad);  
**PC**=policarbonato; **PS**=poliestireno; **PUR**=poliuretano  
**H**=hormigón; **Hasf**= hormigón asfáltico; **M**=mortero; **P**=pasta

### 1.4.2 Uso de fibras obtenidas de residuos sintéticos post-consumo como fibrorefuerzo de matrices cementicias.

En este ítem también se describirán las investigaciones que se consideran más relevantes o directamente relacionadas con el presente trabajo en cuanto a los residuos y/o procedimientos empleados para la obtención de las fibras.

Esta información se complementa con los datos aportados en la Tabla 1.7 donde, según orden cronológico, se ordenan los trabajos de investigación seleccionados en la etapa de estudio del estado del arte sobre uso de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo en el fibrorefuerzo de matrices cementicias.

La característica principal de estas investigaciones es que, en la mayoría, las fibras empleadas son producidas por el reprocesamiento de los residuos. Sea con procesos térmicos o químicos aplicados a las escamas que se obtienen del triturado del residuo, este reprocesado les permite generar las fibras con procedimientos industriales, realizando las modificaciones de forma y textura superficial que se requieran para mejorar la interfaz.

Este proceso de producción de fibra no se diferencia del utilizado para las fibras comerciales con material virgen. Tiene un determinado costo, consume energía y genera emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera de igual forma, con la única diferencia que el material en vez de ser virgen es residual. Es un aporte al medio ambiente porque no se consume más material virgen, con el ahorro de materias primas e insumos energéticos que ello implica, y recicla un residuo post-consumo de difícil gestión, pero aún mantiene efectos de contaminación ambiental.

Incluso, en algunos polímeros, este reprocesado tiene un costo tan alto que no se justifica realizarlo, como se ha llegado a la conclusión en el polietileno de alta densidad (HDPE) para su empleo en matrices poliméricas [112].

Asimismo, se puede apreciar que la mayor parte de los grupos de investigación, tienen como objetivo el empleo de los residuos post-consumo de envases, principalmente aquellos de polietileno tereftalato (PET).

Tabla 1.7 - Investigaciones sobre el uso de residuos sintéticos en la obtención de fibras y empleadas en el refuerzo de matrices cementicias. Orden cronológico.

equipo	referencia	pais	año	residuo	mat	%partícula
Auchey et al	[113]	EEUU	1996	HDPE	H	-----
Wang et al	[114-116]	EEUU	1999 a 2006	alfombras	H	1 - 2
Wang et al	[9]	EEUU	2000	revisión	H	-----
Soroushian et al	[117]	EEUU	2003	automóvil	H	0,06 - 2
Silva et al	[118]	Brasil	2005	PET	P	0,4 y 0,8
Betioli et al	[119]	Brasil	2005	PET	M	0,8
Ochi et al	[120]	Japón	2007	PET	H	0,5 - 1,50
Machovic et al	[121, 122]	Rep. Checa	2008	PET	P	2
Kim et al	[123, 124]	Korea	2008/2010	PET	M	0,1 - 1
Siddique et al	[94]	India	2008	revisión	H	-----
Alhozaimy et al	[125]	Arabia Saudí	2009	LDPE	H	1 - 4
Meddah et al	[126]	Japón	2009	PP	H	0,5 - 3
Won et al	[127]	Korea	2010	PET	p	-----
Fraternali et al	[128]	Italia	2011	PET	H	1
Pereira de Oliveira	[129]	Portugal	2011	PET	M	0,5, 1 y 1,5
Foti	[130]	Italia	2011	PET	H	2,85
Malagavelli et al	[131]	India	2011	HDPE	H	0,5 - 6
Saikia et al	[75]	Portugal	2012	revisión	M/H	-----
Pelliser et al	[132]	Brasil	2012	PET	H	0,05, 0,18 y 0,30

**Referencias:** HDPE=polietileno de alta densidad; LDPE=polietileno de baja densidad;  
 PP=polipropileno; PET=polietileno tereftalato  
 H=hormigón; M=mortero; P=pasta

A pesar de existir procedimientos sencillos para reprocesado de este polímero y varias industrias donde aplicarlo, la textil por ejemplo, sigue siendo el más empleado en envases y embalajes, y por lo tanto del que mayor cantidad de residuo se dispone, existiendo un excedente del mismo al cual se busca darle un destino final medio-ambientalmente amigable.

Para poder relacionar mejor los trabajos relevantes se analizarán agrupados en tres categorías: análisis de resistencias empleando fibras de PET, análisis de degradación empleando fibras de PET y análisis empleando otras fibras.

La visión cronológica de los trabajos se encuentra en la Tabla 1.7.

#### 1.4.2.1. Grupos de investigación que analizan características mecánicas de matrices cementicias reforzadas con fibras provenientes de envases pos-consumo de PET.

##### Grupo de investigación de T. Ochi, país: Japón

El trabajo presentado por el grupo de investigación de **T. Ochi y colaboradores** [120] hace referencia a un método para poder emplear residuos de botellas post-consumo de PET como fibras que refuercen hormigón.

Las fibras en forma de monofilamento las obtuvieron por el procesado térmico del residuo de PET el cual al ser extruido en caliente, por alineación de las cadenas del polímero, se obtienen fibras de mayor resistencia.

A las fibras les determinaron la tensión de humectación, resistencia alcalina y los gases producidos en su combustión.

Comparando estos resultados con los obtenidos con fibras de PP y PVA se obtuvo que la tensión de humectación es menor que la que se produce en las fibras de PVA y mayor que la que se produce en las fibras de PP.

La prueba para determinar la resistencia alcalina se detalla en el punto 1.4.2.2. para su comparación con los resultados obtenidos en otras investigaciones.

En el análisis de los gases generados en la combustión del PET no detectaron gases tóxicos.

Desde el punto de vista del material compuesto estudiaron la miscibilidad de las fibras de PET con el hormigón con mezclas a mano y a máquina, así como las propiedades mecánicas del material endurecido.

Para el ensayo a flexión emplearon el método de 4 puntos en 12 muestras, de 5 probetas cada una, que contemplan tres relaciones agua/cemento (0,65 – 0,60 – 0,55) y cuatro porcentajes en volumen de fibra (0%, 0,5%, 1,0% y 1,5%). A partir de las curvas tensión/deformación de este ensayo han determinado la cantidad energía absorbida. El ensayo a compresión se realizó sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro con 200 mm de altura y se elaboraron cilindros de 50 mm de diámetro por 100 mm de altura para el ensayo a pull-out.

Las conclusiones extraídas son que las fibras se mezclan fácilmente con el hormigón, logrando una buena dispersión. En cuanto a la resistencia a flexión presentó un comportamiento similar al del hormigón reforzado con fibras metálicas, con tensiones de 4-5 MPa y se aprecia el aumento a la tenacidad que proporciona la incorporación de las fibras.

Concluyeron finalmente que para ampliar el uso de la fibra de PET era necesario considerar el coste porque, en el momento de la investigación, el precio en el mercado era comparable al de las fibras de acero, cuando se emplean iguales volúmenes.

Como ejemplos donde ya se estaban aplicando fibras de PET en Japón refieren a revestimientos de túneles, incluyendo los de autopistas.

### Grupo de investigación de D. Foti, país: Italia

La investigación de **D. Foti** [130] refiere a la utilización de fibras de PET, obtenidas por corte mecánico de los envases post-consumo, como refuerzo en hormigón a los efectos de darle mayor ductilidad al mismo.

Se emplearon dos tipos de fibras: en forma de tiras y en forma de aro. Estas últimas fueron obtenidas del corte transversal de los envases post-consumo de 0,5 L. Las muestras se elaboraron en dos series con distintas porcentajes de fibras. La primera con una determinada cantidad en peso y la segunda como un porcentaje del peso total, 0,5% y 0,75%, con lo cual, considerando las muestras patrón, obtuvieron 6 series a ensayar.

Los resultados han demostrado que la adición de una pequeña cantidad de fibras de PET provenientes del corte de envases post-consumo, puede tener una gran influencia en el

comportamiento post-fisuración de los elementos de hormigón. Ambas formas, en tiras o en aros, mejoraron en gran medida la tenacidad de los especímenes.

La tenacidad se vio especialmente aumentada cuando se emplearon las fibras en forma de aro, justificándolo por la forma de las mismas que ayuda a unir el hormigón a cada lado de la sección fisurada.

### Otras Investigaciones

Existen otros grupos de investigación que han empleado fibras de PET obtenidas de envases post-consumo, pero, al igual que ocurre con el primer equipo mencionado, las fibras son obtenidas por el reprocesado de este material, a partir de las escamas de forma amorfa que se obtienen de su trituración.

De particular importancia encontramos el trabajo realizado por el grupo de **J. Kim y colaboradores** [123, 124], donde analizan el efecto de la adherencia de las fibras con la matriz cementicia. Para ello, en el trabajo presentado en 2008 plantean la modificación de la superficie de la fibra con ácido maleico, y en el trabajo de 2010 dicha modificación la realizan por procesos de estampado analizando el efecto de varios de ellos.

#### 1.4.2.2. Grupos de investigación que analizan degradación de matrices cementicias reforzadas con fibras provenientes de envases pos-consumo de PET ó de las fibras en sí mismas.

##### Grupo de investigación de D. A. Silva, país: Brasil

El equipo brasilero de **D.A. Silva y colaboradores** [118] han trabajado con mortero de cemento reforzado con fibras que son un subproducto en una fábrica que produce cuerdas, obtenidas del reciclaje de polietileno tereftalato (PET), principalmente en lo que refiere a la durabilidad de las mismas cuando se encuentran en el medio alcalino de la matriz cementicia.

En mortero se emplearon fibras de 26  $\mu\text{m}$  de diámetro y 20 mm de longitud con un ratio de 769, en fracciones de 0,4% y 0,8%. Las muestras se curaron durante 164 días para

luego determinarles la resistencia a compresión, tracción, flexión y módulo de elasticidad.

Para investigar la durabilidad de las fibras en medios alcalinos se colocaron fibras durante 150 días a 5 °C, 25 °C y 50 °C en las siguientes soluciones:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  saturado (pH=12,3), 0,1 molar de NaOH (pH=13) y solución de Lawrence (0,48 g/l  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +3,45 g/l KOH+0,88 g/l NaOH, pH=12,9), que es una estimación de la composición de agua de los poros en una pasta de cemento completamente hidratada [118]

De los resultados obtenidos concluyen que las fibras de PET no tienen influencia significativa en las resistencias del mortero así como en su módulo de elasticidad.

Sin embargo encuentran que los índices de tenacidad disminuyen con el tiempo lo que justifican por la degradación de las fibras de PET a través de una hidrólisis alcalina debida a la matriz cementicia.

Para afirmar estas conclusiones realizaron el análisis con Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de fibras que estuvieron sumergidas durante 150 días en soluciones alcalinas. Aquí se encontró que las fibras inmersas en la solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y en la solución de Lawrence sufrieron una modificación superficial quedando áspera. En las imágenes del SEM obtenidas se puede apreciar esa degradación y plantean que en algunos sectores puede llegar a ser completa.

### Grupo de investigación de T. Ochi, país: Japón

Entre las tareas de investigación de este grupo [120], mencionado en el punto 1.4.2.1., se encuentra el estudio de la degradación de las fibras provenientes de PET post-consumo en un medio alcalino.

Para ello dejaron inmersas durante 120 horas, a temperatura de  $60 \pm 2$  °C, fibras de PET en una solución de hidróxido de sodio con una concentración de  $10 \text{ g/dm}^3$ .

Para ver si la exposición a este medio degrada o no a la fibra realizaron ensayos de tracción de las mismas después de este período comparando los resultados con la resistencia a tracción de fibras sin inmersión. Los resultados obtenidos muestran que en

las fibras expuestas a la solución alcalina difiere su resistencia a tracción solamente en -1% respecto a las fibras vírgenes.

Observando los resultados con las fibras comerciales resulta que, para las de PP, la resistencia a la tracción después de la inmersión fue del 86% respecto a las vírgenes, y en el caso de las fibras de PVA, la resistencia a la tracción después de la inmersión fue de 56% respecto a las vírgenes. Dado que en las fibras comerciales se produjo un deterioro significativo concluyen que las fibras de PET tienen suficiente álcali resistencia y por lo tanto a su inmersión en matrices cementicias.

### Grupo de investigación de V. Machovic, país: República Checa

**V. Machovic y colaboradores** [121, 122] han investigado el uso de fibras de PET obtenidas de envases post-consumo como refuerzo de hormigones, y especialmente en lo que refiere a su degradación química y térmica en pastas cementicias. Las fibras son producidas por la empresa SLOVKORD quien desde 2004 participa en la línea de reciclaje de PET que proviene de residuos de envases post-consumo.

La degradación química se ha estudiado mediante la inmersión de las fibras en soluciones alcalinas 1 molar de hidróxido de sodio e hidróxido de calcio saturada, entendiéndose que estos productos son los que se forman en la zona de transición matriz/fibra debido a la hidratación del cemento.

El envejecimiento térmico lo han realizado mediante la aplicación de ciclos de temperatura en una cámara termostatizada a humedad constante. A estas fibras se las analizó mediante Espectroscopia infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR), Calorimetría Diferencial de barrido (DSC), un analizador gravimétrico para determinar la absorción de vapor de agua y la textura se analizó con un Microscopio Electrónico de barrido (SEM).

A la matriz cementicia empleada, con una relación agua/cemento = 0,4, se le adicionó 2% en peso de fibras de 10 mm de PET, realizándose probetas de 20 x 20 x 100 mm<sup>3</sup> para el ensayo de flexión a 3 puntos y de 20 x 20 x 20 mm<sup>3</sup> para el ensayo de compresión. También se analizó mediante porosimetría.

De los resultados obtenidos en la Espectroscopia Infrarroja se aprecia que se produce una hidrólisis alcalina que induce a la escisión de las cadenas poliméricas en fragmentos más pequeños de etilenglicol y ácido tereftálico, y aumenta el contenido de grupo hidroxilo en la superficie del PET.

Con el DSC se determinó que la cristalinidad disminuyó en las muestras envejecidas excepto en las que se utilizó hidróxido de sodio. Para todas las muestras el contenido total de isómeros trans y amorfos disminuyó en comparación con el PET original.

Las fibras de PET hidrolizadas alcalinamente tienen aproximadamente un 90% de resistencia que la fibra original, mientras que las que fueron sometidas a ciclos de temperatura presentan entre un 65% y 77% de la fuerza de la fibra original.

La porosidad de los compuestos PET-cemento disminuyen con la adición de las fibras y con la modificación de su superficie por hidrólisis alcalina.

Los ensayos a flexión en 3 puntos demuestran que la incorporación a la matriz cementicia en una proporción del 2% en peso de fibras de PET aumenta notablemente su resistencia máxima a la flexión y módulo elástico.

### Grupo de investigación de J-P. Won, país: Korea

La investigación llevada a cabo por **J-P. Won y colaboradores** [127] tuvo por objetivo analizar la durabilidad a largo plazo de una matriz cementicia reforzada con fibras de PET, procedentes de envases post-consumo.

Para la evaluación de esta durabilidad realizaron estudios de permeabilidad de cloruros, comportamiento en ciclos de hielo/deshielo y sometimiento a diversas condiciones ambientales (alcalina, sal, cloruro de calcio, ácido sulfúrico, sulfato de sodio), de muestras de hormigón reforzado con estas fibras de PET.

Para producir el medio alcalino trabajaron con una solución alcalina de pH 12,6 producida mediante la mezcla de 0,16% de  $\text{Ca(OH)}_2$  + 1% de NaOH + 1,4% de KOH y para el medio salino se realizó una solución de NaCl al 3%. Para el entorno de cloruro de calcio utilizaron una solución de 4%  $\text{CaCl}_2$ , el entorno de ácido sulfúrico 3% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y la solución de sulfato de sodio 3%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Luego de realizar ensayos de resistencia a compresión y observar las superficies de las fibras mediante Microscopia Electrónica de barrido (SEM) obtiene como conclusión que el hormigón fibro-reforzado no presenta diferencias en cuanto a la permeabilidad de cloruros respecto al mismo hormigón sin fibras, pero si tuvo mejor desempeño al someterlo a los ciclos de hielo/deshielo.

Al exponer la muestra a un ambiente alcalino se observó una degradación progresiva en la superficie de las fibras a medida que aumentó el tiempo transcurrido.

Las muestras del material cementicio reforzado con las fibras de PET se expuso al ambiente salino se observó poco deterioro en la superficie de las fibras, además de no ser progresivo. Lo opuesto sucedió al exponerlo en el ambiente ácido, donde la fibra se deterioró superficialmente y progresó con el aumento del tiempo de envejecimiento. Según los resultados de los ensayos a compresión, en este medio ácido, no sólo se ha producido un deterioro de la fibra sino de todo el material compuesto.

#### 1.4.2.3. Grupos de investigación que analizan características mecánicas en matrices cementicias reforzadas con fibras provenientes de otros residuos de material sintético.

##### Grupo de investigación de Y. Wang, país: EEUU

Este grupo, integrado por **Youjiang Wang y colaboradores** [9, 114-116], ha publicado, desde mediados de la década de los años 90, en varias oportunidades, los trabajos empleando residuos pos-consumo textiles, principalmente de aquellos provenientes de alfombras.

Estos residuos son heterogéneos, contienen varios componentes: 36% polipropileno, 18% fibras de nylon y 46% goma látex como adhesivo.

Las fibras de nylon en la mayoría de los casos se reprocesan, a través de procedimientos químicos, para producir fibras que serán nuevamente parte de alfombras.

En cuanto al uso de estas fibras como refuerzo de matrices cementicias, compararon su empleo, en longitudes entre 12 y 25 mm y fracciones en volumen del 1% y 2%, con el

empleo de fibras de polipropileno virgen, en longitudes de 19mm de largo y fracciones en volumen de 0,5% y 1%.

Se determinaron las capacidades resistentes a flexión, a través de ensayos a 4 puntos, y a compresión, con probetas cilíndricas.

En ambos ensayos se observó que la presencia de fibras produjo una rotura más dúctil comparada con la que se produce en igual matriz sin fibras de refuerzo.

Las conclusiones extraídas de sus trabajos es que el empleo de los residuos de alfombra que contienen polipropileno y nylon como fibrorefuerzo de hormigón es efectivo, mejorando la resistencia y el tipo de rotura, así como aumentando su tenacidad y durabilidad.

En el **año 2000** publican una revisión sobre el empleo de algunas fibras como fibrorefuerzo de hormigón. Además de plantear sus propias conclusiones sobre el uso de residuos de alfombras que contengan polipropileno y nylon, presentan un resumen de los trabajos realizados por otros grupos en donde el desempeño de estas fibras es comparado con las provenientes de otros residuos.

Mencionan el trabajo realizado por **Wu y colaboradores** [133, 134] quienes estudiaron el uso de fibras provenientes de residuos post-consumo de neumáticos y de alfombras para examinar los efectos en la fisuración por contracción.

Respecto al uso de fibras celulósicas provenientes de residuos de periódicos y revistas menciona el trabajo realizado por **Soroushian y colaboradores** [135, 136]. En comparación con el empleo de fibras de celulosa virgen en igual matriz se observó que poseían similar resistencia a flexión, menor absorción y contenido de humedad y mayor densidad.

Por otra parte mencionan los trabajos realizados por **Keyvani y Saeki** [137] sobre el uso de virutas de acero como un sustituto de fibras de acero en el hormigón. Este equipo encontró que los residuos empleados tenían una resistencia mayor que el material virgen y en una dosificación de 150 Kg/m<sup>3</sup> obtuvieron un aumento del 113% en la resistencia a tracción en comparación al hormigón no reforzado.

Relacionado con este trabajo, en la revisión mencionan el trabajo realizado por **Auchey y Dutta** [113] presentado en 1996, en el cual emplearon fibras recicladas de polietileno de alta densidad (HDPE) en hormigón. Este equipo obtuvo fibras de 19 a 38 mm de largo, 1,6 mm de espesor y 1 mm de ancho de envases post-consumo de leche, con fracciones de 0,1%, 0,2% y 0,4% del volumen.

Las probetas cilíndricas realizadas, después de 28 días, fueron sometidas a ciclos de hielo/deshielo y monitoreando el módulo dinámico de elasticidad.

Concluyeron que el uso de estas fibras como refuerzo secundario para fisuración producida por contracción y cambios de temperatura en extremas condiciones es factible y que proporcionan una resistencia igual o superior a las muestras control, sin fibras, así como a las que contienen fibras vírgenes de polipropileno en igual fracción en volumen.

A título informativo comentar que también mencionan los trabajos realizados por **Hamoush y El-Hawary** [138] empleando plumas de aves de corral como fibras de refuerzo para el hormigón.

### Grupo de investigación de P. Soroushian, país: EEUU

Equipo integrado por **P. Soroushian y colaboradores** [117], además de los trabajos con fibras celulósicas mencionados por Wang en el punto anterior, han investigado sobre el fibrorefuerzo de hormigón con fibras obtenidas del triturado de parachoques de automóviles y mezcla de plásticos.

Las fibras provenientes de los parachoques se produjeron de 28 mm de longitud y las provenientes de la mezcla de plásticos con partículas de 19 mm de dimensión máxima.

En el hormigón se empleó cemento tipo I con una relación agua/cemento = 0,45, y se realizó el análisis de los efectos del fibrorefuerzo en estado fresco y endurecido. Para ello se midió el asentamiento, contenido de aire, densidad, resistencia a compresión, resistencia a flexión, abrasión, permeabilidad del aire, resistencia a impacto y retracción.

La conclusión obtenida es que estas fibras, empleadas en porcentajes adecuados, producen ganancias importantes en la resistencia del hormigón a impacto. Algunas de las fibras empleadas han mejorado la impermeabilidad.

En las fibras que por su sistema de reciclado tuvieron una esbeltez menor que las fibras vírgenes también bajó su eficiencia por lo que podría incorporarse con dosis más altas.

#### 1.4.2.4. Relación cronológica de trabajos publicados.

En la Tabla 1.7 se presentan trabajos de investigación publicados que refieren al uso de fibras de PET, obtenidas de envases post-consumo, como refuerzo de matrices cementicias.

Nuevamente se puede observar que los equipos de investigación están ubicados en varios continentes, demostrando una vez más que la preocupación por darle un destino final a este tipo de residuo es mundial.

En ella también se puede observar que los porcentajes empleados para este fin, como refuerzo, son de menor cuantía que los vistos en el punto 1.4.1., en su uso como sustitución de agregado.

Si bien ya ha sido mencionado al exponer el trabajo de D. Foti, es de destacar que, dentro de estos trabajos, su investigación es la única que obtiene las fibras a partir de un procedimiento de corte, lo cual no solo agiliza el proceso de obtención de las mismas sino también protege al medio-ambiente evitando la generación de gases de efecto invernadero en el reprocesado del material.

Este procedimiento de obtención de fibras también es considerado el que mejor se adecúa a países en vía de desarrollo donde los costos deben minimizarse y el costo de la mano de obra es menor.

## 1.5 Referencias Bibliográficas

- [1] Espinosa, P.C., *Manual de Construcciones de Albañilería*. Madrid: Severiano Baz, 1859.
- [2] Groth, P., "Fibre reinforced concrete : fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders," Structural Engineering, Luleå tekniska universitet, Luleå, 2000.
- [3] *BÉTON, Histoire du béton - Encyclopédie Universalis*. Disponible: <http://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/1-histoire-du-beton/>
- [4] Jiménez Montoya, P., García Meseguer, A. y Morán Cabré, F., *Hormigón Armado*, 14ª ed.: Editorial Gustavo Gili, 2001.
- [5] Mallick, P. K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*: M. Dekker, 1988.
- [6] *ICTSD • Asbestos crean controversia en reunión de la Convención de Róterdam*. Disponible: <http://ictsd.org/i/news/puentesquincenal/10159/>
- [7] *III Encuentro Sindical de Salud Ocupacional Latinoamericano y El Caribe de los trabajadores de la Construcción*, 2006. Disponible: [http://www.uocra.org/a\\_internacional/EncuentroSaludLaboral.htm](http://www.uocra.org/a_internacional/EncuentroSaludLaboral.htm)
- [8] Bentur, A. y Mindess, S., *Fibre Reinforced cementitious Composites*: Taylor & Francis, 2006.

- [9] Wang, Y., Wu, H.C. y Li, V.C., "Concrete Reinforcement with Recycled Fibers," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 12, pp. 314-319, 2000.
- [10] "Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010," ed: Organización Panamericana de la Salud (OPS) ; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) ; Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ; gobiernos de países intervinientes de América Latina y el Caribe, 2011.
- [11] "Estrategia Española de Desarrollo Sostenible," ed: Ministerio de la Presidencia, 2007.
- [12] "Capítulo 5 - Calidad Ambiental.," en *Sostenibilidad en España 2011*, ed: Observatorio de la Sostenibilidad en España; (OSE), 2012, pp. 199-205.
- [13] *Eurostat Statistics Database*. Disponible: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- [14] "PLAN NACIONAL INTEGRADO DE RESIDUOS PARA EL PERIODO 2008-2015," ed: BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO N°49, Sección 1, 2009, pp. 19895-20016.
- [15] *Global Municipal Solid Waste Continues to Grow. Worldwatch Institute . 2012*. Disponible: <http://www.worldwatch.org/>
- [16] *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT). México*. Disponible: <http://www.semarnat.gob.mx/>
- [17] *SUSTENTA Compromiso Empresarial para el Manejo Integral de Residuos Sólidos A.C. México*. Disponible: <http://www.sustenta.org.mx/>
- [18] "Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana.," ed. República Oriental del Uruguay, 2005.
- [19] Davison, P. y Asch, R.G. , "Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 432, pp. 173-180, June 27, 2011 2011.
- [20] *Cicloplast*. Disponible: [http://www.cicloplast.com/seg\\_nivel/index.html?reciclado](http://www.cicloplast.com/seg_nivel/index.html?reciclado)

- [21] .: KUBITZ - *Soluções sociais e ambientais*. Disponible: <http://www.kubitz.com.br/?i=1>
- [22] *El reciclaje del plástico | Guillermo Barguñó Jané | Treball de recerca*. Disponible: <http://www.elrecicladedelplastico.com/index.php>
- [23] *México envía residuos plásticos a Asia - Actualidad - Alto Nivel*. Disponible: <http://www.altonivel.com.mx/7499-mexico-envia-residuos-plasticos-a-asia.html>
- [24] *En México sólo se recicla el 15% del plástico: ANIPAC | El Economista*. Disponible: <http://eleconomista.com.mx/industrias/2011/02/14/mexico-solo-se-recicla-15-plastico-anipac>
- [25] *Reciclaje de desechos, fuente de ingreso económico y cuidado ambiental - Yahoo! Noticias México*. Disponible: <http://mx.noticias.yahoo.com/reciclaje-desechos-fuente-ingreso-econ%C3%B3mico-cuidado-ambiental-160200842.html>
- [26] GAIKER. *GAIKER-IK4 soluciona el problema de reciclado de la fibra óptica*. Disponible: <http://www.gaiker.es/ing/detallecomunicacion.aspx?id=d033f73c-0abc-454d-b9c3-04a65e97466c>
- [27] *Eurometal Recycling*. Disponible: <http://www.eurometalrecycling.com/>
- [28] Fernández Cánovas, M., *Hormigón: Adaptado a la Instrucción de Recepción de Cementos y a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE*, 8 ed.: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2007.
- [29] Soriano Martínez, L., "Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC)," Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia., Valencia, 2007.
- [30] "La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono," Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; PNUMA ; OMM2005.
- [31] *IPCC Special Reports on Climate Change - Complete online versions | UNEP/GRID-Arendal - Publications - Other*. Disponible: <http://www.grida.no/publications/>

- [32] AENOR, "UNE-EN 197-1:2000 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.," ed, 2000.
- [33] AENOR, "UNE-EN 197-2:2000 - Cementos. Parte 2: Evaluación de la conformidad.," ed, 2000.
- [34] Velázquez Rodríguez, Sergio "Aplicaciones del Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC) en la Preparación de Conglomerantes Hidráulicos. Estudio de sus Propiedades Puzolánicas," Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2002.
- [35] Lalinde Castrillón, L.F., "Una aportación al estudio de GRC con materiales puzolánicos: adición de cenizas volantes de central termoeléctrica de carbón"," Tesis Diploma de Estudios Avanzados (DEA), Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005.
- [36] Payá, J, Monzó, J, Borrachero, M.V, Mellado, A y Ordoñez, L.M, "Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method," *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 227-231, 2001.
- [37] Jauberthie, R., Rendell, F., Tamba, S. y Cisse, I., "Origin of the pozzolanic effect of rice husks," *Construction and Building Materials*, vol. 14, pp. 419-423, 2000.
- [38] Alcocel, E. G.<sup>a</sup> , Garcés, P., Martínez, J. J., Payá, J. y Andión, L. G.<sup>a</sup>, "Efecto de la adición de ceniza de lodo de depuradora (CLD) en las propiedades mecánicas y niveles de corrosión de las armaduras embebidas en morteros de cemento Portland," *Materiales de Construcción; Vol 56, No 282 (2006)*, 2006.
- [39] Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M.V. y Córcoles, A., "Use of sewage sludge ash(SSA)-cement admixtures in mortars," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 1389-1398, 1996.
- [40] Monzó, J, Payá, J, Borrachero, M.V y Peris-Mora, E, "Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content," *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 87-94, 1999.

- [41] Puertas, F., Barba, A., Gazulla, M. F., Gómez, M. P., Palacios, M. y Martínez-Ramírez, S., "Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clínker de cemento Portland: caracterización y activación alcalina," *Materiales de Construcción; Vol 56, No 281 (2006)*, 2006.
- [42] Lavat, A.E., Trezza, M.A. y Poggi, M., "Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture," *Waste Management*, vol. 29, pp. 1666-1674, 2009.
- [43] AENOR, "UNE-EN 14889-1:2008 Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad," ed, 2008.
- [44] Pérez Taboada, Carolina, "Modelización constructiva de comportamiento de materiales compuestos para el uso civil," Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- [45] Arango Campo, S.E., "Fluencia a flexión del hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) en estado fisurado.," Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010.
- [46] Mohammadi, Y., Carkon-Azad, R., Singh, S.P. y Kaushik, S.K., "Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 183-189, 2009.
- [47] Kang, S-T., Lee, Y., Park, Y-D. y Kim, J-K., "Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber," *Composite Structures*, vol. 92, pp. 61-71, 2010.
- [48] Barakat, S.A. y Altoubat, S., "Concrete welding using steel fibers," *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 2065-2073, 2010.
- [49] Sevil, Tuğçe, Baran, Mehmet, Bilir, Turhan y Canbay, Erdem, "Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 892-899, 2011.
- [50] Enfedaque Diaz, A., "Resistencia a impacto de morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio (GRC)," Tesis Doctoral, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2008.

- [51] Proctor, B.A., "A review of the theory of GRC," *Cement and Concrete Composites*, vol. 12, pp. 53-61, 1990.
- [52] Enfedaque, A., Cedón, D., Gálvez, F. y Sánchez-Gálvez, V., "Envejecimiento y pérdida de propiedades en los morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio (GRC)," *Anales de Mecánica de la Fractura 26*, vol. 2, pp. 531-536, 2009.
- [53] AENOR, "UNE-EN 1170 Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio.," ed, 1998 - 2009.
- [54] AENOR, "UNE-EN 15191:2011 Productos prefabricados de hormigón. Clasificación de prestaciones del hormigón reforzado con fibra de vidrio.," 2011.
- [55] AENOR, "UNE-EN 15422:2009 Productos prefabricados de hormigón. Especificaciones para las fibras de vidrio destinadas al armado de morteros y hormigones. ," 2009.
- [56] AENOR, "UNE-EN 14889-2:2008 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Deficiones, especificaciones y conformidad.," ed, 2008.
- [57] *Sika - Soluciones y Productos*. Disponible: <http://esp.sika.com/es/>
- [58] Ma, Y. ; Tan, M. ; Wu, K., "Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortars," *Materials and Structures*, vol. 35, pp. 165-169, April 2002.
- [59] Segre, N. ; Tonella, E. ; Joekes, I., "Evaluation of the stability of polypropylene fibers in environments aggressive to cement-based materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp. 75-81, 1998.
- [60] Medina, F. ; Cifuentes, H., "Hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Influencia de la ductilidad de la fibra sobre la fragilidad y el efecto tamaño.," *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 1, pp. 215-220, 2007.
- [61] Melián, G. ; Barluenga, G. ; Hernández-Olivares, F., "Aumento de la tenacidad de hormigones autocompactables reforzados con fibras cortas de polipropileno," *Materiales de Construcción*, vol. 60, pp. 83-97, 2010.

- [62] Amat Rueda, T. , "Hormigones reforzados con fibras acrílicas," *Materiales de Construcción*, vol. 47, pp. 43-56, 1997.
- [63] Puertas, F. ; Amat, T. ; Vázquez, T., "Comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con fibras acrílicas y de polipropileno," *Materiales de Construcción*, vol. 50, pp. 69-84, 2000.
- [64] Song, P.S. ; Hwang, S. ; Sheu, B.C., "Strength propertiese of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes," *Cement and Concrete Research* 35, pp. 1546-1550, 2005.
- [65] *Fibras para concreto - Intersec*. Disponible: <http://fibrasintersec.com.br/>
- [66] Mindess, S., Wang, N., Rich, L.D. y Morgan, D.R., "Impact resistance of polyolefin fibre reinforced precast units," *Cement and Concrete Composites*, vol. 20, pp. 387-392, 1998.
- [67] Savastano Jr., H., "Materiais à base de dimento reforcados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construcao de baixo custo," Tesis Concurso de Livre-Docencia, Departamento de Engenharia de Construcao Civil da Escola Politécnica, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 2000.
- [68] Ramakrishna, G. y Sundararajan, T., "Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 575-582, 2005.
- [69] Savastano Jr., H., Santos, S.F., Radonjic, M. y Soboyejo, W.O., "Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, pp. 232-243, 2009.
- [70] Ramakrishna, G. y Sundararajan, T., "Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 547-553, 2005.
- [71] Brandt, A., *Cement based composites - 2nd ed.: Materials, Mechanical Properties and Performance*: Taylor & Francis, 2009.
- [72] Bentur, A., "Role of interfaces in controlling durability of fiber-reinforced cements," *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 2-7, february 2000.

- [73] Chan, Y.W. y Li, V.C., "Age effect on the characteristics of fibre/cement interfacial properties," *Journal of Materials Science* 32, pp. 5287-5292, 1997.
- [74] Pacios, A. ; Fernández Cánovas, M., "Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras," *Materiales de Construcción*, vol. 47, pp. 247-248, 1997.
- [75] Saikia, Nabajyoti y de Brito, Jorge, "Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 385-401, 2012.
- [76] Naik, T.R. ; Singh, S.S. ; Huber, C.O. ; Brodersen, B.S., "Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, pp. 1489-1492, 1996.
- [77] Gaggino, R., "Elementos constructivos con PET reciclado," *Revista Tecnología y Construcción N° II*, vol. 19, pp. 51-64, 2003.
- [78] Gaggino, R., "Elementos constructivos con plásticos reciclados," presented at the Jornadas sobre Procesos de adopción tecnológica para viviendas. , Córdoba. Argentina., 2004.
- [79] Gaggino, R., Berreta, H., Gatani, M. y Arguello, R., "Nueva tecnología constructiva con plástico reciclado," presented at the III Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida, San Fernando del Valle de Catamarca, Argentina., 2006.
- [80] Gaggino, R., Arguello, R., Gatani, M. y Berreta, H., "Tecnología sustentable para la construcción utilizando plásticos reciclados," presented at the Seminario Internacional NUTAU 2006, San Pablo. Brasil, 2006.
- [81] Gaggino, R., Berreta, H., Gatani, M. y Arguello, R., "Ladrillos, bloques y placas con plásticos reciclados para viviendas de interés social," presented at the 16ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Mendoza. Argentina, 2006.
- [82] Gaggino, R., Arguello, R. y Berreta, H., "Aplicación de material plástico reciclado en elementos constructivos a base de cemento," presented at the IV Encuentro

- Nacional y II Latinoamericano. Edificaciones y comunidades sustentables, Campo Grande. Brasil, 2007.
- [83] Gaggino, R., "Ladrillos y placas construidos con plasticos reciclados aptos para la autoconstrucción," *Revista INVI. Santiago. Chile*, vol. 23, pp. 137-163 (spanish), 2008.
- [84] Gaggino, R., Berreta, H. y Arguello, R., "Tecnología ambientalista para la construcción utilizando plástico reciclado, para viviendas de interés social," presented at the Primer Congreso Argentino de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología, Bernal, Buenos Aires. Argentina, 2007.
- [85] Gaggino, R. y Arguello, R., "RECYCLING PLASTICS FOR ECONOMICAL HOUSING," presented at the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK, 2009.
- [86] Gaggino, R. y Arguello, R., "Valorización y reciclaje de residuos plásticos como materiales de construcción amigables ambientalmente," presented at the II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción (II-SARAMAT), Valencia. España, 2010.
- [87] Económica, Centro Experimental de la Vivienda. *Componentes para transferencia tecnológica. Nuevos materiales para mampuestos con plásticos reciclados*. Disponible: <http://www.ceve.org.ar/ttplasticos.html>
- [88] Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, Y.J. y Lachemi, M., "Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2829-2835, 2009.
- [89] Choi, Y-W., Moon, D-J., Chung, J-S. y Cho, S-K., "Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 776-781, 2005.
- [90] Marzouk, O. Yazoghli ; , Dheilily, R.M. ; y Queneudec, M., "Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites," *Waste Management*, vol. 27, pp. 310-318, 2007.

- [91] Laukaitis, A., Žurauskas, R. y Kerienė, J., "The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, pp. 41-47, 2005.
- [92] Batayneh, M., Marie, I. y Asi, I., "Use of selected waste materials in concrete mixes," *Waste Management*, vol. 27, pp. 1870-1876, 2007.
- [93] Luis, A., Rendon, N. y Korody, M.E., "Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) - cemento," *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, vol. 23, pp. 77-86, 2008.
- [94] Siddique, R., Khatib, J. y Kaur, I., "Use of recycled plastic in concrete: A review," *Waste Management*, vol. 28, pp. 1835-1852, 2008.
- [95] Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P. y Turcry, P., "Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, pp. 806-814, 2008.
- [96] Panyakapo, Phaiboon y Panyakapo, Mallika, "Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete," *Waste Management*, vol. 28, pp. 1581-1588, 2008.
- [97] Ismail, Z. Z. y AL-Hashmi, E. A., "Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement," *Waste Management*, vol. 28, pp. 2041-2047, 2008.
- [98] Modro, N.L.R. ; Oliveira, A.P.N., "Avaliação de concreto de cimento Portland contendo residuos de PET," *Revista Matéria*, vol. 14, pp. 725-736, 2009.
- [99] Kan, A. y Demirboğa, R., "A novel material for lightweight concrete production," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, pp. 489-495, 2009.
- [100] Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A. y Gutiérrez, A., "Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios," *Waste Management*, vol. 29, pp. 2707-2716, 2009.
- [101] Kou, S.C., Lee, G., Poon, C.S. y Lai, W.L., "Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes," *Waste Management*, vol. 29, pp. 621-628, 2009.

- [102] Remadnia, A. Dheilily, R.M.; Laidoudi, B. y Quéneudec, M., "Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 3118-3123, 2009.
- [103] Akçaözoğlu, S. y Atiş, C.D., "Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 4052-4058, 2011.
- [104] Akçaözoğlu, S., Atiş, C.D. y Akçaözoğlu, K., "An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete," *Waste Management*, vol. 30, pp. 285-290, 2010.
- [105] Hannawi, K., Kamali-Bernard, S. y Prince, W., "Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates," *Waste Management*, vol. 30, pp. 2312-2320, 2010.
- [106] Frigione, M., "Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete," *Waste Management*, vol. 30, pp. 1101-1106, 2010.
- [107] Chidiac, S.E. y Mihaljevic, S.N., "Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 855-863, 2011.
- [108] Galvão, J.C.A., Portella, K. F., Joukoski, A., Mendes, R. y Ferreira, E.S., "Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1049-1055, 2011.
- [109] Ferreira, L., de Brito, J. y Saikia, N., "Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 196-204, 2012.
- [110] Wang, Ru y Meyer, Christian, "Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 975-981, 2012.

- [111] Widodojoko, Lilies y Purnamasari, P. Eliza, "Study the Use of Cement and Plastic bottle Waste as Ingredient Added to the Asphaltic Concrete Wearing Course," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 43, pp. 832-841, 2012.
- [112] Avila, A.F. , Rodrigues, P.C.M. , Santos, D.B. y Faria, A.C.A., "A dual analysis for recycled particulate composites: linking micro- and macro-mechanics," *Materials Characterization*, vol. 50, pp. 281– 291, 2003.
- [113] Auchey, F. L. y Dutta, P. K. , "The use of recycled high density polyethylene fibers as secondary reinforcement in concrete subjeeted tdo severe environment," presented at the International Offshore and Polar Engineering Conference Los Angeles, EEUU, 1996.
- [114] Wang, Y., "Utilization of recycled carpet wastet fibers for reinforcement of concrete and soil," *Polymer-plastics technology and engineering* vol. 38, pp. 534-546, 1999.
- [115] Wang, Y. ; Zhang, Y. ; Polk, M. ; Kumar, S. ; Muzzy, J., "Recycling of Carpet and Textile Fibers," in *Plastics and the enviromnment: a handbook*, ed New York: John Wiley & Sons, 2003, pp. 697-725.
- [116] Wang, Y., "Utilizztion of Recycled Carpet Waste Fibers for Reinforcement of Concrete and Soil," in *Recycling in Textiles*, Wang, Y., Ed., ed Cambridge, UK.: Woodhead Publishing Ltd., 2006.
- [117] Soroushian, P. ; Plasencia, J. ; Ravanbakhsh, S., "Assessment of Reinforcing Effects of Recycled Plastic and Paper in Concrete," *ACI Materials Journal. Title n°. 100-M23*, May-June 2003.
- [118] Silva, D.A. , Betioli, A.M., Gleize, P.J.P., Roman, H.R., Gómez, L.A. y Ribeiro, J.L.D., "Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1741– 1746, 2005.
- [119] Betioli, A.M. y Silva, D.A., "Evaluation of Durability of PET Fibers Under Diverse Aggressive Environments " presented at the International Conference On Durability of Building Materials and Components, Lyon, Francia., 2005.

- [120] Ochi, T., Okubo, S. y Fukui, K., "Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 448–455, 2007.
- [121] Machovic, V., Andertová, J., Kopecky, L., Cerny, M., Borecka, L., Pribyl, O., Kolar, F. y Svitilová, J., "Effect of aging of PET fibre on the mechanical properties of PET fibre reinforced cement composite," *Ceramics – Silikáty*, vol. 52 pp. 172-182, 2008.
- [122] Machovic, V., Kuklik, P., Kolar, F., Kopecky, L., Nemecek, J. y Svitilova, J., "Application of Raman Microscopy to evaluation of aging effect on micromechanics of concrete reinforced with PET strips," *Acta Informes de Investigación* 2008.
- [123] Kim, J.H.J., Park, C.G., Lee, S.W., Lee, S.W. y Won, J.P., "Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, pp. 442-450, 2008.
- [124] Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.-H. J. y Song, Y.-Ch., "Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 232-240, 2010.
- [125] Alhozaimy, A.M. y Shannag, M.J., "Performance of concretes reinforced with recycled plastic fibres," *Magazine of Concrete Research*, 61, pp. 293-298, 2009.
- [126] Meddah, Mohammed Seddik y Bencheikh, Mohamed, "Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 3196-3205, 2009.
- [127] Won, Jong-Pil, Jang, Chang-II, Lee, Sang-Woo, Lee, Su-Jin y Kim, Heung-Youl, "Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 660-665, 2010.
- [128] Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L. y Incarnato, L., "Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete," *Composite Structures*, vol. 93, pp. 2368-2374, 2011.

- [129] Pereira de Oliveira, L. A. y Castro-Gomes, J. P., "Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1712-1717, 2011.
- [130] Foti, D., "Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1906-1915, 2011.
- [131] Malagavelli, V. ;Paturu, N.R., "Strength Characteristics of Concrete using Solid Waste an Experimental Investigation," *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 04, pp. 937-940, 2011.
- [132] Pelisser, F. ; Montedo, O.R.K. ; Gleize, P.J.P. ; Roman, H.R., "Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete," *Materials Research (online)*, 2012.
- [133] Wu, H.C., Lim, Y.M. y Li, V.C., "Shrinkage behavior of cementitious composites with recycled fibers," *Proc. 2nd Annual Great Lakes Geotechnical/Geoenvironmental Conf. on Waste Materials and Their Geotechnical/Geoenvironmental Applications*, 1994.
- [134] Wu, H.C., Lim, Y.M., Li, V.C. y Foremsky, D.J., "Utilization of Recycled Fibers in Concrete," *ASCE. Proceeding Materials Eng. Conference*, pp. 799-808, 1996.
- [135] Soroushian, P., Arola, R. y Shah, Z., "Recycling of wood and paper in cementitious materials," *Symposium LA – Materials Interactions Relevant to Recycling of Wood-Based Materials*, vol. 266, pp. 165-175, 1992.
- [136] Soroushian, P., Shah, Z. y Won, J. P., "Optimization of wastepaper fiber-cement composites," *ACI Materials Journal*, vol. 92(1), pp. 82-92, 1995.
- [137] Keyvani, S. A. y Saeki, N., "Behavior of fiber concrete composites using recycled steel shavings," *Journal of Solid Waste Technology and Management*, vol. 24(1), pp. 1-8, 1997.
- [138] Hamoush, S. A. y El-Hawary, M. M., "Feather fiber reinforced concrete.," *Concrete International. Design and Construction*, vol. 16(6), pp. 33-35, 1994.

## 2 OBJETIVOS



## 2.1 Objetivo general.

La situación de los residuos sintéticos a nivel mundial, particularmente en los países en vía de desarrollo, sigue siendo una preocupación en cuanto a su destino final. Al mismo tiempo, la búsqueda de materiales para la elaboración de fibras que refuercen los compuestos de matrices cementicias es una tarea fundamental para incrementar las prestaciones de los mismos, también para priorizar la componente medioambiental, así como desarrollar nuevos usos de estos materiales cementicios vinculados a la autoconstrucción de viviendas de interés social por parte de los propios beneficiarios.

Así pues, **el objetivo general de este trabajo se concreta en la valorización de residuos sintéticos mediante su uso como fibras de refuerzo para matrices cementicias, a través de materiales y tecnologías apropiadas, con el mínimo coste económico y medioambiental, y de fácil asimilación por los recolectores informales de los países en vías de desarrollo, de manera que se incrementen sus beneficios económicos así como la calidad de sus viviendas.**

El impacto que generaría el resultado de la investigación podría conducir a:

- a) Reducir la disposición final de residuos plásticos en vertederos o incineradoras, disminuyendo la producción de gases de efecto invernadero, con la contribución medio-ambiental que esto conlleva.
- b) Mejorar las características de los materiales con matriz cementicia en cuanto a la resistencia a tracción, tenacidad, aislamiento térmica y acústica.

- c) Obtener un material compuesto que se pueda emplear en sistemas constructivos de bajo coste económico y medioambiental.
- d) Generar una fuente de ingresos extra para los recolectores informales de estos residuos, quienes, sin mucha inversión, podrían aplicarlos directamente en sus viviendas o comercializarlos con un valor agregado al producir las fibras.

## 2.2 Objetivos específicos.

Para alcanzar el objetivo general, se plantean objetivos específicos a cumplir:

- Caracterización de los residuos sintéticos disponibles para la producción de fibras: envases plásticos de bebidas post-consumo y los provenientes del cableado interior del servicio de telecomunicaciones.
- Estudiar los procedimientos con los que realizar el corte mecánico de los residuos, de forma sencilla y de bajo coste, para obtener fibras de tamaño y relación de esbeltez adecuada a la función de refuerzo.
- Analizar la compatibilidad de materiales para garantizar que el medio alcalino de la matriz cementicia no produzca una degradación a la fibra que incapacite su trabajo durante la vida útil del material compuesto.
- Estudiar la interacción entre fibra y matriz en su interfaz, principalmente analizando la adherencia entre ambas.
- Realizar ensayos mecánicos de flexión, compresión e impacto del material compuesto, determinando valores de límite elástico, resistencia máxima, módulo de elasticidad y tenacidad, para compararlos con materiales sin fibroreforzar.
- Estudiar la influencia del tamaño y forma de la probeta en las características mecánicas del material compuesto.
- Plantear elementos constructivos adecuados para el empleo de este material.



# 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



## 3.1 Materiales

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron únicamente materiales de origen Español. Cada uno de ellos se describe a continuación.

### 3.1.1 Cemento

Para la elaboración de pastas y morteros se han utilizado cemento Portland gris tipo CEM I-52,5R suministrado por la empresa LAFARGE ASLAND (Sagunto-Valencia), con un diámetro medio de partícula de 20,6  $\mu\text{m}$ , según distribución granulométrica de la Figura 3.1.

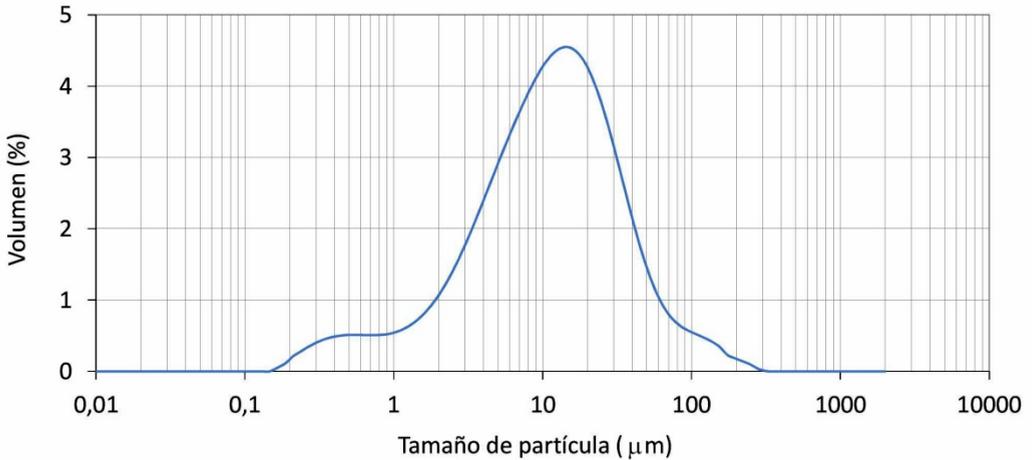
En el estudio de degradación, este cemento fue utilizado en una mezcla de 40 ml de agua destilada con 2 g de cemento Pórtland.

Las características químicas de este cemento se expresan en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Composición química del cemento utilizado (% en peso), \*pérdida al fuego

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>P.F*</b>
19,90	5,38	3,62	63,69	2,14	3,66	1,17	0,10	2,02

Figura 3.1 - Distribución granulométrica del cemento (CEMI-52,5R)



### 3.1.2 Áridos

En la fabricación de morteros se utilizó una mezcla de áridos de carácter silíceo, suministrados por la empresa Caolines Lapidra (Lliria-Valencia), con un módulo de finura de 3,34.

### 3.1.3 Agua

El agua utilizada en la preparación de pastas y morteros es extraída de la red potable que suministra a la Universitat Politècnica de València.

### 3.1.4 Adiciones

En los estudios de durabilidad se emplearon las adiciones que se mencionan a continuación. Ceniza volante (FA) también se empleó en la elaboración de mortero en una de las muestras fibro-reforzada.

#### 3.1.4.1 Ceniza Volante (FA)

La ceniza volante pertenece al grupo de las cenizas silíceas o silico-aluminosas, fue suministrada por la central termoeléctrica de Andorra (Teruel), y sometida a un proceso de molienda durante 60 minutos en un molino de bolas tipo Gabrielli Mill-2 para mejorar su reactividad. La composición química se refleja en la Tabla 3.2.

El diámetro medio de partícula de 9,2  $\mu\text{m}$ , según distribución granulométrica de la Figura 3.2.

Tabla 3.2 - Composición química de la ceniza volante utilizada (% en peso), \*pérdida al fuego

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>P.F*</b>
40,94	24,65	13,59	9,83	1,59	1,60	1,40	0,34	2,44

#### 3.1.4.2 Residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico (FCC)

Se ha utilizado Residuo de catalizador de craqueo catalítico de la empresa petroquímica BP, suministrado por la refinería de BP OIL España S.A (Grao de Castellón-Valencia), y sometido a un proceso de molienda en fábrica. La composición química del catalizador utilizado se observa en la Tabla 3.3.

El diámetro medio de partícula de 17,1  $\mu\text{m}$ , según distribución granulométrica de la Figura 3.2.

Tabla 3.3 - Composición química del FCC utilizado (% en peso), \*pérdida al fuego

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>P.F*</b>
48,20	46,00	0,95	<0,01	<0,01	n.d	<0,01	0,50	1,50

#### 3.1.4.3 Ceniza de Cáscara de Arroz (RHA)

La ceniza de cascarilla de arroz (RHA) fue proporcionada por la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A., procedente de un proceso de incineración industrial. Antes de ser utilizada fue molida durante 10 minutos en un molino tipo Gabrielli Mill-2, con 80 bolas,

obteniendo un diámetro medio de partícula de 15,7  $\mu\text{m}$  para incrementar su reactividad. La distribución granulométrica se puede apreciar en la Figura 3.2.

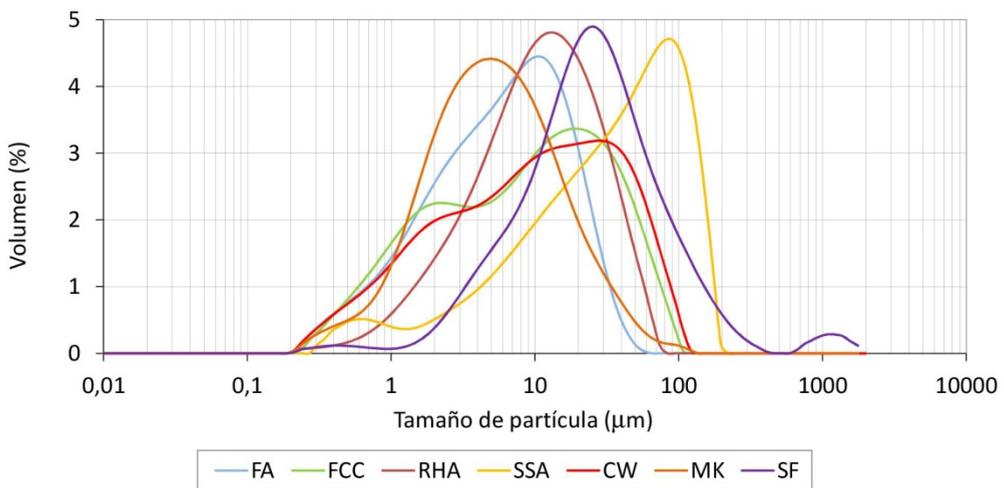
#### 3.1.4.4 Ceniza de Lodo de Depuradora (SSA)

La ceniza de lodo de depuradora (SSA) se recogió de la planta de tratamiento de aguas residuales ubicada en Pinedo, Valencia (España). En esta planta, parte de los lodos residuales se incinera en un reactor de lecho fluidizado de arena de sílice, las partículas sólidas se recogieron por precipitadores electrostáticos. El diámetro medio de partícula de 52,8  $\mu\text{m}$ , según distribución granulométrica de la Figura 3.2.

#### 3.1.4.5 Residuo Cerámico (CW)

El residuo cerámico (CW) se obtuvo de la molienda de ladrillos huecos cerámicos. Mediante trituradora se redujo su tamaño original hasta obtener trozos de unos 4 cm y luego se realizó la molienda con 98 bolas de alúmina durante 40 minutos. Finalmente se obtuvieron partículas con un diámetro medio de 19,9  $\mu\text{m}$ , según distribución granulométrica de la Figura 3.2.

Figura 3.2 - Distribución granulométrica de las adiciones empleadas.



#### 3.1.4.6 Metacaolín (MK)

El metacaolín es un producto de síntesis, que se obtiene mediante la calcinación del caolín, a temperaturas que oscilan en el intervalo de 700-850 °C. Se trata de un material de gran finura (9,3 µm de diámetro medio de partícula) y alta actividad puzolánica, y fue proporcionado por la empresa OMYA Clariana S.L. (Figura 3.2)

#### 3.1.4.7 Humo de sílice (SF)

Esta puzolana proviene del proceso de manufactura del silicio metálico y del ferrosilicio. Las principales características del humo de sílice son un alto contenido en sílice, alta superficie específica y estructura amorfa. Sus partículas son esféricas y tienen un diámetro medio de 69,6 µm. El material empleado fue el suministrado por la empresa Elkem Silicon Materials, referencia 940D. (Figura 3.2)

### 3.1.5 Otros

#### 3.1.5.1 Hidróxido de Sodio

Se preparó una solución alcalina uno molar de Hidróxido de Sodio (1 M NaOH) con un pH = 14, la cual se utilizó como medio básico en el estudio de degradación de las fibras. El hidróxido sódico empleado es en pellets marca PANREAC.

#### 3.1.5.2 Hidróxido Cálculo

En el estudio de degradación se utilizó, en forma de pasta, con una relación de agua 1:1 y para preparar una solución saturada, hidróxido cálcico de pureza comprendida entre el 95% y el 100%, de la firma comercial PANREAC.

#### 3.1.5.3 Ácido Clorhídrico

Para quitar residuos de matriz cementicia adheridos a las fibras se utilizó una disolución de ácido clorhídrico diluida 1:10. Las características del ácido clorhídrico son 37% PA ACS ISO de la firma comercial PANREAC.

#### 3.1.5.4 Etanol

En la determinación de la densidad aparente de las fibras se empleo Etanol 96% (USP, BP, Ph, Eur) de la firma comercial PRS-CODEX.

### 3.1.6 Fibras

#### 3.1.6.1 Residuos

La selección de residuos empleados en esta investigación han surgido del análisis preliminar realizado sobre aquellos que representan un gran volumen y tienen el mayor efecto negativo, desde el punto de vista medio-ambiental, por ser destinados a vertederos o incineradoras.

#### Envases plásticos post-consumo

En estos residuos los plásticos mayoritariamente encontrados son PET (tereftalato de polietileno) y HDPE (polietileno del alta densidad).

#### PET

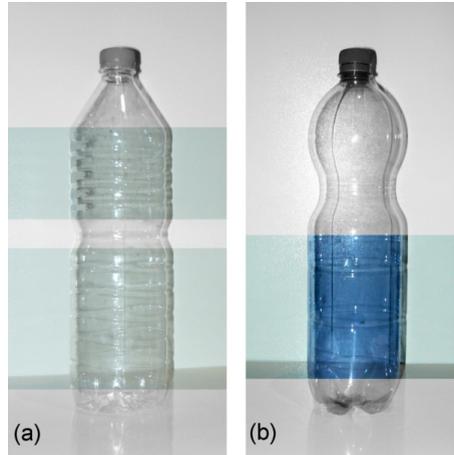
En los **envases post-consumo de PET**, fundamentalmente de bebidas de consumo diario como aguas y refrescos, encontramos dos grupos según correspondan a bebidas carbonatadas o no, los que a su vez pueden tener diferencias en la orientación de sus moléculas según el sistema utilizado en su producción. [1]

Para disminuir incertidumbres en la investigación principalmente se ha trabajado con envases procedentes de dos marcas comerciales:

- envases de agua sin gasificar, marca Bezoya (P-NC, PET bebida no carbonatada),
- envases de agua gasificada, marca Primavera (P-C, PET bebida carbonatada).

Para que las características de las fibras fueran más homogéneas solamente se ha utilizado la parte de los envases que corresponde a una misma exposición al estiramiento en el momento de su fabricación, como se indica en la Figura 3.3.

Figura 3.3 - Envases de PET con indicación de zona empleada para fibras:  
(a) P-NC, (b) P-C.



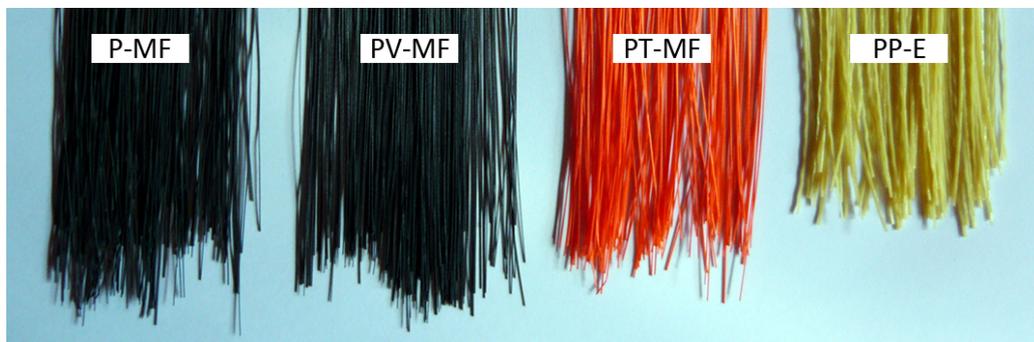
Asimismo, la empresa SP-Berner ha aportado fibras que se fabrican para la producción de escobas, obtenidas por reprocesado de escama de PET procedente de botellas post-consumo.

Es en forma de hebra o multifilamentos (**P-MF**) debiéndose adecuar el largo por medios mecánicos de corte (Figura 3.4). Este material se empleó con el fin de comparar las prestaciones del PET reprocesado con el que se obtiene directamente del corte de envases.

Con igual fin, en los trabajos preliminares se realizaron ensayos con otras fibras proporcionadas por citada empresa (Figura 3.4), las cuales son elaboradas con material virgen:

- ✓ PET virgen en multifilamentos (**PV-MF**),
- ✓ PET virgen termo-conformado en multifilamentos (**PT-MF**) y
- ✓ Polipropileno (**PP-E**, fibras de polipropileno para escobas)

Figura 3.4 - Fibras multifilamento producidas por SP-Berner para escobas.



## HDPE

Para disminuir incertidumbres, se trabajó con **envases post-consumo de leche, (HDPE-L)** de una sola firma comercial, Central Lechera Asturiana. Igual a lo mencionado para envases de PET, las fibras se obtuvieron solamente de la parte del envase que corresponde a una misma exposición al estiramiento en el momento de su fabricación (Figura 3.5)

Figura 3.5 - Envases de HDPE-L con indicación de zona empleada para fibras.



### Servicios de telecomunicaciones

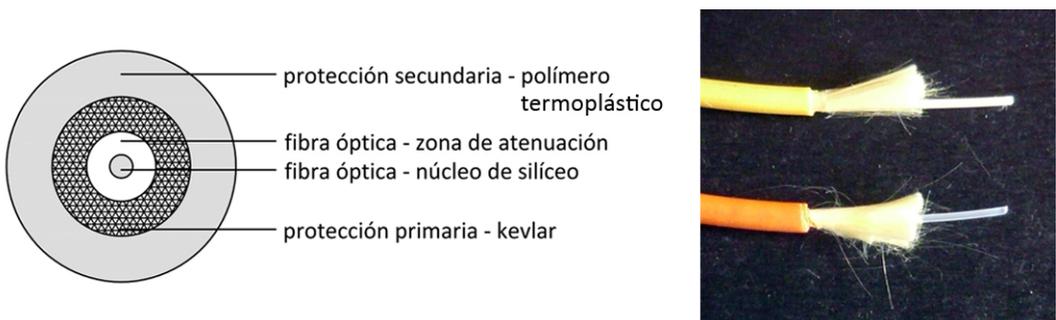
Dentro de los residuos provenientes de servicios de telecomunicaciones se ha trabajado con los de cableado interior de repartidores de fibra óptica. Estos tienen su origen en los sobrantes de poca longitud de instalaciones así como de sustituciones de tendidos existentes y fueron proporcionados por la Empresa Telefónica.

Como se aprecia en la Figura 3.6 este residuo se compone de tres materiales de características distintas optándose por trabajar con cada uno de ellos por separado.

Quitando la fibra de kevlar (aramida), que le proporciona al conjunto la resistencia solicitada por normativa, y de la cual existen aplicaciones en refuerzo de estructuras, se ha analizado la viabilidad de valorizar los otros dos componentes:

- Fibra óptica (**FO**) – sección cilíndrica, compuesto de un núcleo síliceo y una capa exterior, mezcla de síliceo con materiales plásticos, con un bajo índice de refracción que atenúa la pérdida en la transmisión (Figura 3.6).
- Funda de protección (**FP-FO**) – funda exterior de protección secundaria realizada en material termoplástico de alto módulo de Young, generalmente polietileno de baja densidad (LDPE) o un compuesto de policloruro de vinilo (PVC (Figura 3.6) con forma de cilindro hueco o tubo.

Figura 3.6 - Cable de fibra óptica. Partes constitutivas.



Entre los residuos disponibles se ha encontrado variedad en cada uno de ellos por lo cual, como se puede ver en el Capítulo 4, en los estudios preliminares se utilizó solo un

tipo de cada uno, no sin antes haber realizado la caracterización físico-mecánica de un número representativo para determinar el grado de diversidad existente.

### Industria textil

La industria PIEL.SA proporcionó un residuo de sus alfombras, las provenientes del recorte de las mismas que consisten en fibras acrílicas de espesores micrométricos, empleándose en uno de los estudios preliminares. Dado que su comportamiento es muy diferentes al de las otras fibras utilizadas, y existen antecedentes sobre la utilización de este material como fibro-refuerzo, se optó por dejarlo pendiente para investigaciones futuras (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Fibras acrílicas proporcionadas por Piel SA



#### 3.1.6.2 Tamaños empleados

En cuanto a las dimensiones de las fibras obtenidas es necesario realizar una clasificación según la forma de presentación del material en los residuos por su vinculación con el proceso de producción de las mismas.

#### Fibras obtenidas de hojas delgadas (envases post-consumo)

Los residuos de envases post-consumo, una vez seccionados longitudinalmente, presentan forma de hoja delgada, o película, variando el espesor de las mismas en función del envase (Tabla 3.4). Del corte mecánico de estas láminas se obtuvieron

partículas prismáticas de base rectangular (Figura 3.8) relacionadas con los distintos ensayos en las Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

En los ensayos de tracción se utilizaron muestras con forma de halterio (Figura 3.9) de 40 mm de longitud y anchos aproximados a  $3 \pm 0,5$  mm.

Tabla 3.4 - Espesores de láminas obtenidas de envases post-consumo.

envase	espesor (mm)
<b>P-NC</b> PET bebida no carbonatada	0,274
<b>P-C</b> PET bebida carbonatada	0,251
<b>HDPE-L</b> Polietileno de alta densidad de envases lácteos	0,318

Tabla 3.5 - Longitudes de partículas prismáticas de, aproximadamente, 1 mm de ancho.

ensayo	6 mm	12 mm	15 mm	18 mm	20 mm
estudios previos	■				
flexión/compresión prismas		■			
flexión placas				■	
pull-out	■	■	■	■	■

Tabla 3.6 - Longitudes de partículas prismáticas de, aproximadamente, 4 mm de ancho.  
(\* ) fibras P-NC

ensayo	18 mm	35 mm	50 mm
flexión placas	■	■	■
impacto	■	■	■
pull-out	■	■	(*)

Figura 3.8 - Fibras obtenidas de envases post-consumo: PET y HDPE.

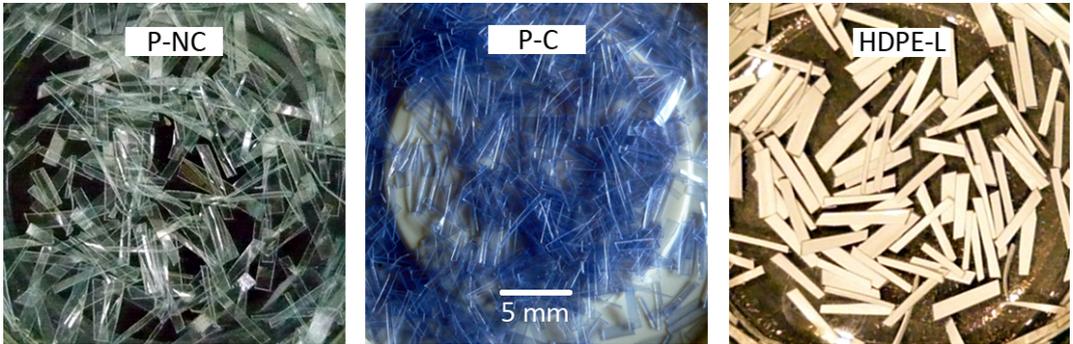
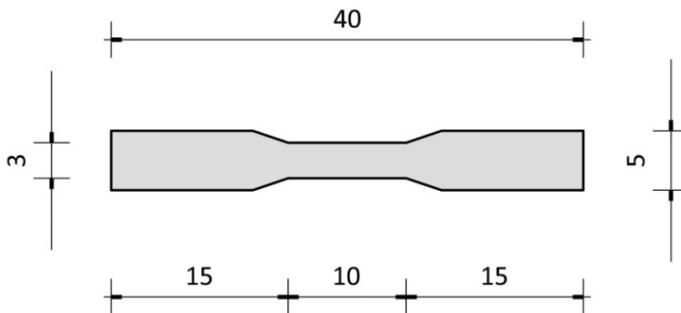


Figura 3.9 - Muestras en forma de halterio. (dimensiones en mm)



### Fibras obtenidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica)

Estos materiales, proporcionados por la empresa SP-Berner así como la fibra óptica en sí misma, tienen secciones aproximadamente circulares de pequeño diámetro.

Para la obtención de las fibras solamente fue necesario adecuar su longitud (L) a través de cortes mecánicos simples (Figura 3.10). En las Tabla 3.7 y Tabla 3.8 se expresan las dimensiones de estas fibras y su relación con los ensayos realizados.

Tabla 3.7 Fibras producidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica).

fibra	6 mm	12 mm	18 mm	40 mm
<b>P-MF</b> PET residuo de envases, multifilamentos				
<b>PV-MF</b> PET virgen, multifilamentos				
<b>PT-MF</b> PET virgen termoconformado, multifilamentos				
<b>PP-E</b> Polipropileno de escobas				
<b>FO</b> Fibra óptica SIECOR C-8				

Tabla 3.8 - Longitudes de fibras producidas de hebras y relación con ensayos.  
(\* ) Por su sección tendiente a circular NO pueden tener forma de halterio.

	6 mm	12 mm	18 mm	40 mm (*)
estudios previos				
flexión/compresión prismas				
Flexión placas				
tracción fibras				

Figura 3.10 - Fibras obtenidas de elementos lineales.



Fibras obtenidas de cilindros huecos o tubos de sección circular.

Particularmente estas fibras son las procedentes de la funda de protección de la fibra óptica (FP-FO). En los ensayos realizados con este material se emplearon con la sección entera, en forma de aro y con una sección igual a la cuarta parte de la original (cuarto de aro) (Figura 3.11)

Se utilizaron fibras de 6 mm en los estudios preliminares, de 12 mm en las determinaciones de resistencia a flexión y compresión de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> y de 40 mm de longitud en la determinación de la resistencia a tracción de la propia fibra.

Figura 3.11 - Fibras obtenidas de cilindros huecos  
Sección entera (izquierda) – Cuarto de sección (derecha)



## 3.2 Equipos

### 3.2.1 Molienda.

Estudios realizados sobre las adiciones han demostrado que es más activo si se reduce el tamaño de partícula original de estos materiales [2, 3].

Para la molienda de las adiciones originales se utilizó un molino de bolas modelo Gabrielli Mill-2, que consiste en un recipiente de cerámica de un litro de capacidad, en el cual se introducen bolas de alúmina de 2 cm de diámetro y una determinada cantidad de material original, mediante un temporizador se programa el molino para el tiempo definido en cada caso y posteriormente se procede a la recogida del material molido. El molino puede apreciarse en la Figura 3.12.

Figura 3.12 - Molino de bolas

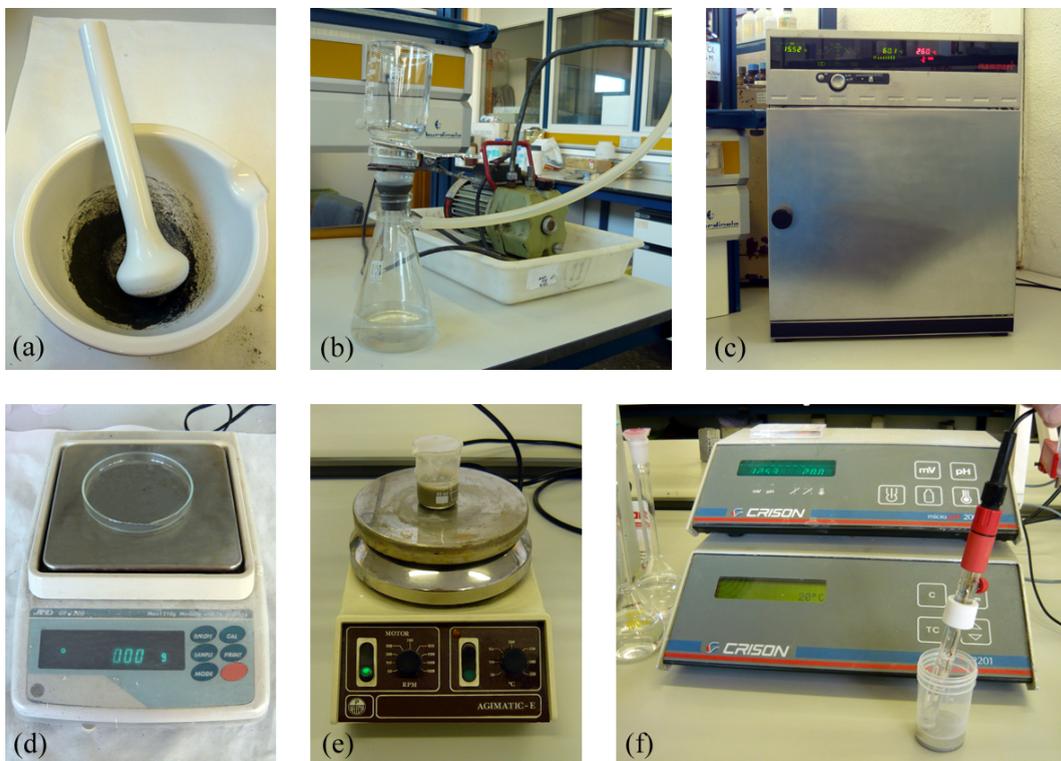


### 3.2.2 Medición de pH

Para medir el pH de las pastas en los estudios de degradación de fibras, se empleó el instrumental que se puede observar en la Figura 3.13.

El equipo fundamental de este conjunto es el medidor, habiéndose empleado para ello un pH-metro marca Crison, modelo micro pH 2001, dotado de un electrodo de pH resistente a medios alcalinos, según Figura 3.13 (f).

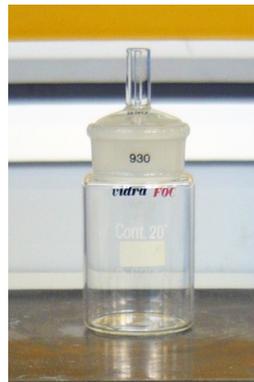
Figura 3.13 - Equipamiento para medida de pH: (a) mortero; (b) bomba de vacío; (c) estufa; (d) balanza; (e) agitador; (f) medidor de pH.



### 3.2.3 Densidad Aparente

Para la determinación de la densidad aparente de los materiales empleados para las fibras se siguió el método del picnómetro líquido, según Norma UNE-EN ISO 1183-1:200 [4], que se desarrolla en el punto 3.3.2.1. Para ello se utilizó un picnómetro de Hubbard, marca Vidra Foc, referencia 765/2, con capacidad de 49,62 ml a 20 °C (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Picnómetro de Hubbard



### 3.2.4 Caracterización dimensional de fibras

En la caracterización dimensional de las fibras se utilizó un calibre digital marca Stainless Hardened, con precisión de 0,01 mm y un micrómetro marca Mahr, modelo 40 EX, con precisión de 0,001 mm (Figura 3.15)

Figura 3.15 - Instrumentos de medición.  
Calibre (izquierda) – Micrómetro (derecha)



### 3.2.5 Granulometría por difracción láser

El fenómeno de la difracción láser se basa en que cuando un frente de ondas (luz) llega a un obstáculo se produce una dispersión del frente, de modo que se producen una serie de interferencias constructivas y destructivas que dan lugar a un patrón de difracción. La radiación láser es la utilizada por los equipos de granulometría para analizar los distintos tamaños de partícula del material escogido.

Para la determinación de la distribución de tamaños de partículas del cemento y adiciones se utilizó el analizador de tamaños de partícula Mastersizer 2000 de Malvern Instruments. Las principales características de este equipo, que se muestra en la Figura 3.16, son:

- ✓ Rango de medida en la franja de 0,02 a 2000 micras.
- ✓ Principio de medición: dispersión de Fraunhofer y Mie
- ✓ Fuentes de luz
- ✓ Luz roja: Láser de helio neón
- ✓ Luz azul: Fuente de luz de estado sólido
- ✓ Sistema de detección
- ✓ Dispersión frontal
- ✓ Dispersión lateral
- ✓ Retrodifracción
- ✓ Dispersión de ángulo amplio frontal
- ✓ Retrodispersión.

Figura 3.16 - Equipo de granulometría por difracción láser



### 3.2.6 Análisis termogravimétrico (TG)

Para el análisis de las matrices cementicias a distintas edades del proceso de hidratación, en esta investigación se ha utilizado la termogravimetría (TG), donde se registra continuamente la variación de masa de la muestra colocada en una atmósfera controlada, en función de la temperatura, o del tiempo, al ir aumentando la temperatura de la muestra. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo se denomina termograma o curva de descomposición térmica.

El equipo que se ha utilizado es un módulo TGA 850 Mettler- Toledo (Figura 3.17), que permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA).

El equipo cuenta con una electrobalanza horizontal, un horno y sensores de temperatura que están en comunicación con un ordenador, donde se registran y se procesan los datos. La microbalanza tiene una resolución de 0,1  $\mu\text{g}$ .

Se utilizaron crisoles de aluminio de 100  $\mu\text{l}$  con tapa sellable. La tapa cuenta con un orificio, el cual facilita la obtención de una atmósfera autogenerada, por lo que la muestra permanece por un mayor tiempo en equilibrio con su fase gaseosa, dando como resultado una mejor separación de los procesos de pérdida de masa consecutivos, con el consecuente desplazamiento de picos hacia temperaturas superiores.

Figura 3.17 - Equipo de termogravimetría.



### 3.2.7 Microscopía Óptica (Lupa binocular)

En los estudios de degradación, complementando lo observado en el microscopio electrónico de barrido, se empleó la Lupa Binocular marca Leica, modelo MZ APO. (Figura 3.18). Para la observación superficial de las fibras y la interfaz con la matriz cementicia se utilizó con una ampliación de hasta 80X.

Figura 3.18 - Microscopio Óptico  
Lupa (izquierda) – Lupa con Microtest (derecha)



En el ensayo de tracción de las fibras con el módulo de microensayos Microtest, se utilizó esta lupa como medio para la captación de imágenes con una ampliación de 20X. El conjunto, lupa con módulo Microtest, es el que se muestra en la Figura 3.18.

### 3.2.8 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Para un conocimiento detallado de la naturaleza física de las superficies de las fibras, a escala sub-micrométrica, tanto en su estado original como en las etapas posteriores al sometimiento en los medios alcalinos, se empleó la técnica de Microscopia de Barrido de Electrones (SEM). Asimismo se utilizó esta técnica y el detector de rayos X (EDS) para el microanálisis de la interfaz fibra/matriz.

Los modelos de Microscopios Electrónicos empleados fueron JEOL JSM 6300 Y JEOL JSM 5410 (Figura 3.19) aplicando un voltaje de 10, 15 y 20 kV para la obtención de las imágenes.

Para metalizar las superficies se empleó oro, por el alto contenido de carbono en las fibras, utilizando para ello el equipo BALTEC SCD 005 con un tiempo de exposición de la muestra de 90 segundos, a una intensidad de 40 mA y una distancia de trabajo de 5 mm (Figura 3.19). La presión a la que se realizó el proceso de recubrimiento fue de  $2,4 \cdot 10^{-2}$  mbar.

Figura 3.19 - Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)  
Equipo SEM (izquierda) – Muestras metalizadas en oro (derecha)



### 3.2.9 Moldes

En la preparación de probetas se han utilizado diferentes moldes según las características del ensayo a realizar. A continuación se detallan los más importantes.

### 3.2.9.1 Flexión / Compresión prismas lineales

En los estudios preliminares para estos ensayos se han utilizado los moldes de prismas lineales de  $25 \times 25 \times 287 \text{ mm}^3$  (Figura 3.20 A). De esta manera, mediante corte con sierra de disco, se obtuvieron por cada amasada 8 probetas de  $25 \times 25 \times 140 \text{ mm}^3$ .

Estos moldes no están normalizados para flexión sino que se corresponden con la Norma UNE 80113:1986 [5] para determinar expansión de cementos, por este motivo se utilizaron solamente en los estudios preliminares de manera de optimizar el volumen de fibra empleado.

En la siguiente etapa, coincidiendo con el aumento en la longitud de las fibras, se utilizaron moldes de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  (Figura 3.20 B) según lo establecido en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [6]

Figura 3.20 - Moldes metálicos para muestras prismáticas.  
A –  $25 \times 25 \times 287 \text{ mm}^3$ ; B –  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$



En ambas situaciones los moldes son de acero y con una dureza que cumple lo especificado en normas.

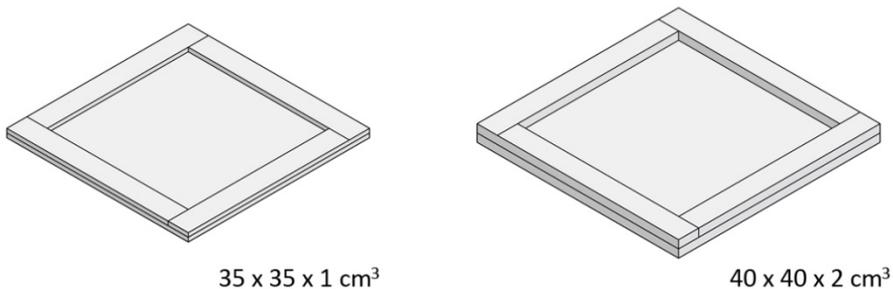
En el caso de los moldes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , para facilitar el llenado, se utilizó una tolva metálica, de paredes verticales de 40 mm de altura. Sobre la tolva se colocó un marco fijado a la mesa de la compactadora mediante cuatro pernos roscados, para asegurar la posición correcta de la tolva sobre el molde. Asimismo se utilizó un marco con las dimensiones adecuadas al molde de  $25 \times 25 \times 287 \text{ mm}^3$  para su correcto posicionado en el momento de la compactación.

### 3.2.9.2 Flexión prismas superficiales (placas)

Para flexión de placas se han empleado cuatro tipo de moldes, dos realizados totalmente en metacrilato y dos con base de metacrilato y laterales de acero.

Los moldes realizados totalmente en metacrilato responden a dos espesores de placas distintos, variando también sus otras dos dimensiones:  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$  y  $40 \times 40 \times 2 \text{ cm}^3$  (Figura 3.21).

Figura 3.21 - Moldes de metacrilato para elaboración de placas.

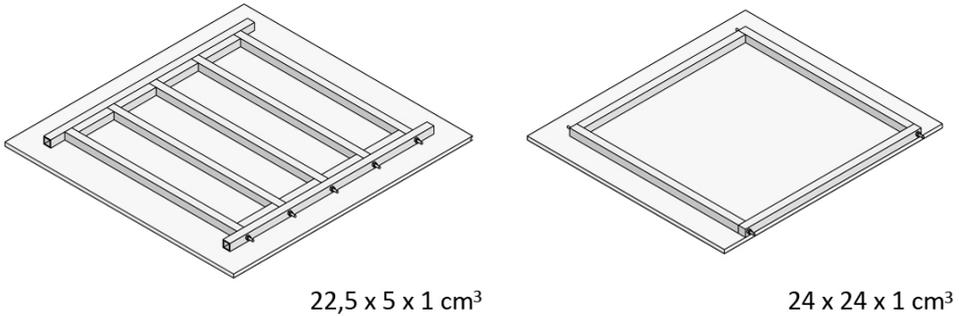


Los otros dos moldes responden a la necesidad de obtener las muestras a ensayar sin realizar cortes con sierra de disco de manera de no producir tensiones extras en las mismas.

Para ello se ha diseñado un molde desmontable para muestras de  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  (Figura 3.22) conforme a las dimensiones de las probetas de ensayo indicadas en la Norma UNE-EN 1170-4:1998 [7], tomada de referencia ante la ausencia de una norma para matrices cementicias con fibras plásticas.

Asimismo, tomando como referencia la Norma UNE-EN 12467:2006 [8] referente a placas de fibrocemento, se han elaborado moldes de  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  (Figura 3.22), que corresponden a la clasificación de "placas de pequeño tamaño" según esta norma, permitiendo realizar el ensayo a flexión con la placa entera en dos direcciones.

Figura 3.22 - Moldes metálicos sobre base de metacrilato.

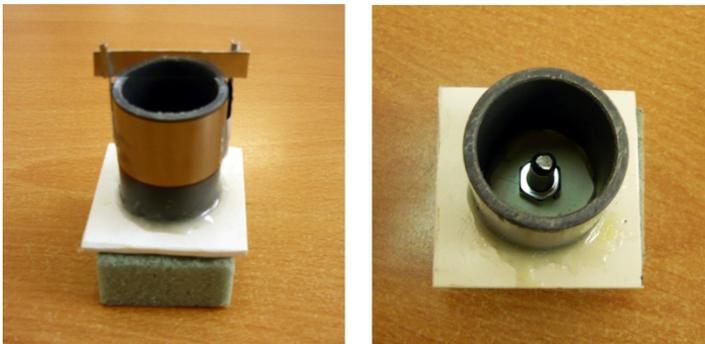


### 3.2.9.3 Pull-Out

En este ensayo se han utilizado dos tipos de moldes: molde simple y molde doble.

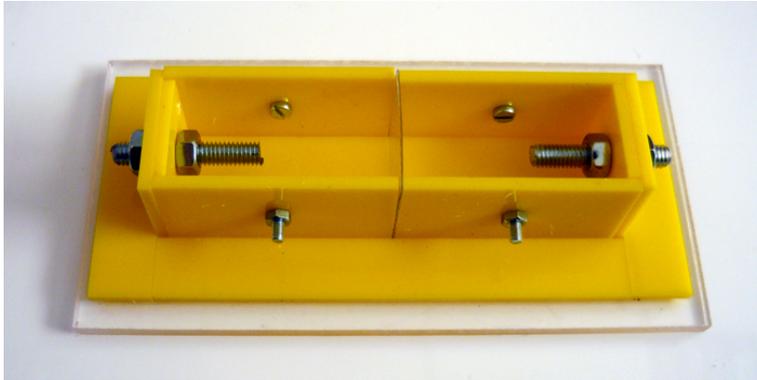
El molde simple (Figura 3.23) parte de la referencia el trabajo realizado por Sehaj Singh y colaboradores con fibras de polipropileno [9] y consta de un cilindro de 25 mm de diámetro y 40 mm de altura cuya base permite ubicar un tornillo pasante. Al desmoldar el tornillo queda la mitad embutida en la muestra y la otra mitad fuera para la sujeción en la base de la prensa.

Figura 3.23 - Ensayo de pull-out - molde simple



Asimismo, el molde doble de 25 x 25 x 100 mm<sup>3</sup>, se diseñó tomando de base este mismo concepto pero permitiendo que la fibra quede totalmente inmersa en la matriz previamente "fisurada". El esfuerzo de tracción se realiza a través de tornillos inmersos en ambos extremos de la muestra (Figura 3.24).

Figura 3.24 - Ensayo de pull-out - moldes doble



### 3.2.10 Preparación de morteros

En la preparación de morteros se utilizaron los equipos requeridos en la Norma EN-UNE 196-1:2005 [6], los cuales son:

#### 3.2.10.1 Amasadora

La amasadora (Figura 3.25 A) utilizada consta de:

- a) Un recipiente de acero inoxidable de una cantidad aproximada de 5 l, con forma y dimensiones como se muestra en la Figura 3.25 B.

Equipado de manera que puede ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, puede ser ajustada y mantenida con precisión.

- b) Una pala de acero inoxidable, de la forma de la representada en la Figura 3.25 C, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas (Tabla 3.9), con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente.

Los dos sentidos de rotación son opuestos, y la relación entre las dos velocidades no debe ser un número entero.

Figura 3.25 - Equipo de amasado  
A – Amasadora; B – Recipiente de 5 l; C – Pala



Tabla 3.9 - Amasadora. Velocidades según tipo de movimiento.

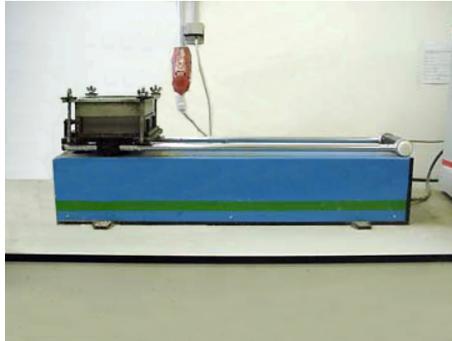
velocidad	rotación ( $\text{min}^{-1}$ )	movimiento planetario ( $\text{min}^{-1}$ )
lenta	$140 \pm 5$	$62 \pm 5$
rápida	$285 \pm 10$	$125 \pm 10$

### 3.2.10.2 Compactadora

La compactadora, se compone esencialmente de una mesa rectangular unida rigidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación. La mesa está provista en el centro de su cara inferior de un martinete de superficie redondeada, debajo del martinete existe un pequeño yunque, cuya cara superior es plana. En posición de reposo la perpendicular común que pasa por el punto de contacto del martinete y yunque, es vertical.

La mesa tiene la cara superior mecanizada y las medidas son mayores que las de la placa base del molde. El sistema de fijación mediante cuatro pernos roscados proporciona al molde una sujeción firme a la mesa. En la Figura 3.26 se muestra la misma.

Figura 3.26 – Compactadora



Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva que le permite una caída libre desde una altura de  $15,0 \pm 0,3$  mm, entre el martinete y el yunque.

### 3.2.10.3 Mesa vibradora

La mesa vibradora es la utilizada en el sistema TEVI para la elaboración de Tejas [10]. Consta de un chasis metálico sobre el cual va montada una placa vibradora accionada por un motor de 12 voltios, de corriente directa (DC). (Figura 3.27)

Puede ser accionada con una batería de automóvil (12 voltios) o desde la red eléctrica con un transformador de corriente alterna a directa (AC/DC), de 10 ó 15 amperios, a 120-180 voltios.

Figura 3.27 - Mesa vibradora



#### 3.2.10.4 Cámara Húmeda

La cámara húmeda es una habitación que posee valores de temperatura y humedad constantes, esta temperatura debe mantenerse alrededor de los  $20 \pm 1$  °C y una humedad relativa no inferior al 90%.

### 3.2.11 Corte Mecánico de Fibras

En el procesado de los residuos para la producción de fibras se exploraron varias opciones de corte mecánico, con el objetivo común de que el procedimiento adoptado sea simple y de coste accesible, que no requiera de una gran inversión por parte de los futuros usuarios.

De los sistemas analizados se ha logrado obtener partículas en forma de fibras con los siguientes equipos:

#### 3.2.11.1 Sistemas Manuales

En las primeras etapas del trabajo las fibras se produjeron mediante tijeras y una cizalla de palanca manual marca Yosan, modelo 30, con una capacidad de corte de 30 hojas de 80 gramos (Figura 3.28). Este equipo se empleó fundamentalmente para el ajuste de la longitud de las fibras.

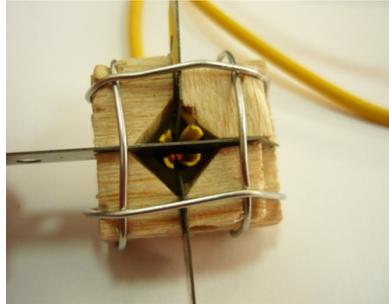
Figura 3.28 - Sistema manual de corte. Cizalla.



Para dividir en cuatro la sección de la funda de protección de la fibra óptica (FP-FO), se ha elaborado un pequeño instrumento manual (Figura 3.29) con cuchillas colocadas

perpendicularmente de forma de obtener el corte en un solo pasaje del material original. Este instrumento es complementario a la cizalla, utilizándose previamente a ella.

Figura 3.29 – Sistema manual de corte. Cortador longitudinal de tubos huecos.



### 3.2.11.2 Sistemas Mecánicos

Como sistema mecánico de corte se ha utilizado tres destructoras de papel, que admiten grapas, marcas United Office, Rexel Prostyle y Fellowes. Con ellas se producen partículas de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ ,  $4 \times 35 \text{ mm}^2$  y  $4 \times 50 \text{ mm}^2$  respectivamente (Figura 3.30).

Figura 3.30 - Sistema mecánico de corte. Destructoras de documentos.

A – United Office; B – Rexel Prostyle; C - Fellowes



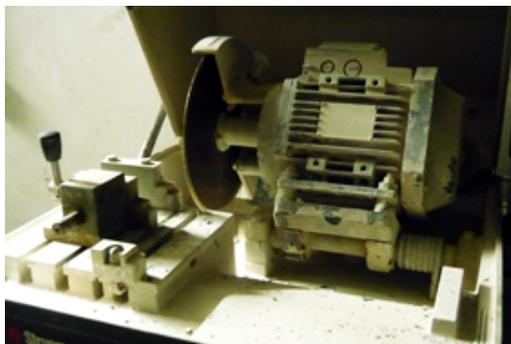
Las destructoras United Office y Rexel Prostyle, poseen un sistema de corte cruzado, produciendo mayor cantidad de desperdicio del material en el momento del corte.

### 3.2.12 Corte de muestras

Para el corte de muestras se han utilizado dos tipos de sierra.

Sierra de sobre-mesa marca Struers (Figura 3.31), con sistema de refrigeración por agua y discos de diamante de 250 mm de diámetro, se empleó para realizar los cortes en las probetas pequeñas: sección transversal en muestras de  $25 \times 25 \times 287 \text{ mm}^3$ , extracción de muestras de  $0,5 \text{ cm}^3$  de descartes de placas, etc.

Figura 3.31 - Sierra de sobre-mesa Struers



Sierra de mesa para hormigón (Figura 3.32) con sistema de refrigeración por agua se utilizó para extraer probetas de  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  de placas de  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$  y  $32,5 \times 5 \times 2$  de placas de  $40 \times 40 \times 2 \text{ cm}^3$ .

Figura 3.32 - Sierra de mesa para hormigón.



## 3.2.13 Ensayos Mecánicos

### 3.2.13.1 Prensa

En los ensayos de flexión y compresión de todas las muestras analizadas se ha utilizado una prensa Instron 3282 (Figura 3.33) la cual consta de:

- ✓ Bastidor con capacidad máxima de carga de 100 kN
- ✓ Células de carga de 5 kN y 100 kN
- ✓ Soporte de dos apoyos ajustables para muestras de hasta 50 mm de ancho
- ✓ Aplicadores de cargas de uno y dos puntos para muestras de hasta 50 mm de ancho.
- ✓ Soporte de dos apoyos ajustables para muestras de hasta 400 mm de ancho
- ✓ Aplicador de una carga para muestras de hasta 350 mm de ancho.
- ✓ Placas platos de soporte y aplicador de carga para ensayos de compresión.
- ✓ Software Bluehill para ensayos estáticos.

Figura 3.33 - Prensa Instron 3382  
(Bastidor equipado con accesorios para ensayo a compresión)



Asimismo esta prensa se utilizó para otorgarle movimiento con velocidad constante, al dinamómetro. Se diseñaron y elaboraron soportes para adaptar ambos equipos, uno

para la sujeción del dinamómetro a la célula de carga fija de la prensa (100 kN) y para sujetar las probetas al bastidor (Figura 3.34).

Figura 3.34 - Prensa Instron. Adaptadores para ensayos con dinamómetro.  
A – Adaptador superior para dinamómetro; B – Adaptador inferior: muestra ensayo pull-out;  
C – Adaptador inferior: mordaza ensayo tracción.



### 3.2.13.2 Microtest

Este módulo de micro-ensayos mecánicos marca DEBEN (Figura 3.35), cuenta con células de carga de 2 kN y 150 N respectivamente y está diseñado específicamente para permitir la observación en tiempo real de la región de alta tensión de una muestra con un microscopio electrónico de barrido (SEM), microscopio óptico o sistema u otros sistemas de observación a escala micro.

Figura 3.35 - Equipo de micro-ensayos Microtest.



Este equipo permite realizar micro-ensayos mecánicos con tasas de extensión menores o iguales a 0,4 mm/min y mediante software establece parámetros de accionamiento y representa la curva esfuerzo/deformación en la pantalla del ordenador.

Incluye accesorios para realizar micro-ensayos de flexión con tres y cuatro apoyos, abrazaderas para ensayos de tracción/compresión y abrazaderas para montaje.

### 3.2.13.3 Dinamómetro

El dinamómetro de la serie PCE-FG es un excelente medidor de fuerza portátil y de precisión. La célula dinamométrica interna del dinamómetro sirve para tracción y compresión, según modelo hasta 500 N ( $\approx$  50 kg). Para alcanzar la alta precisión de 0,05 %, el dinamómetro tiene en cuenta la fuerza gravitatoria del lugar de medición (Figura 3.36)

Tiene dos velocidades de medición, que le permite obtener un buen registro en tiempo real, gracias a la cuota de medición de hasta 40 valores por segundo. Dispone de una pantalla gráfica que le permite valorar los datos almacenados. El almacenamiento de las mediciones se puede efectuar de forma manual, mediante la pulsación de un botón, o ajustando previamente la cuota de medición entre 0,1 y 99,9 s.

Figura 3.36 – Dinamómetro



Las mediciones de tracción y compresión se pueden realizar en diferentes unidades: N, kg, g, lb y oz. Para contrarrestar la desviación natural de los instrumentos de medida,

este dinamómetro dispone de la posibilidad de calibrarse mediante un peso de ajuste externo.

El sistema incluye los siguientes elementos:

- ✓ Medidor de fuerza,
- ✓ Puntas de empuje- 4 piezas, 1 punta del gancho, una pieza de extensión
- ✓ Unidad de suministro de energía - 230 V 50 Hz / V = 12; 1,25 A,
- ✓ Cable SK-1 (dinamómetro-ordenador),
- ✓ CD que contiene un manual de instrucciones y software de análisis y control PCE-FG v1,10 elaborado por PCE Instruments

#### 3.2.13.4 Caída de peso.

El equipo consta de una guía tubular de 41 mm de diámetro interior, con una ranura a 400 mm de altura, una clavija y una esfera metálica de 220 gramos de peso. (Figura 3.37)

Figura 3.37 – Equipo para caída de peso  
Guía tubular, esfera metálica y clavija.



Asimismo, para servir de apoyos de la muestra a ensayar cuenta con dos listones de madera de 2 x 2 x 25 cm<sup>3</sup>.

## 3.3 Procedimientos

### 3.3.1 Producción de fibras

La producción de fibras se realizó en dos etapas: la primera con sistema de corte manual y la segunda con sistemas de corte mecanizados. A continuación se mencionan los procedimientos empleados en cada una de ellas.

#### 3.3.1.1 Sistema de corte manual

Para este sistema de corte se han empleado los equipos mencionados en el punto 3.2.11.

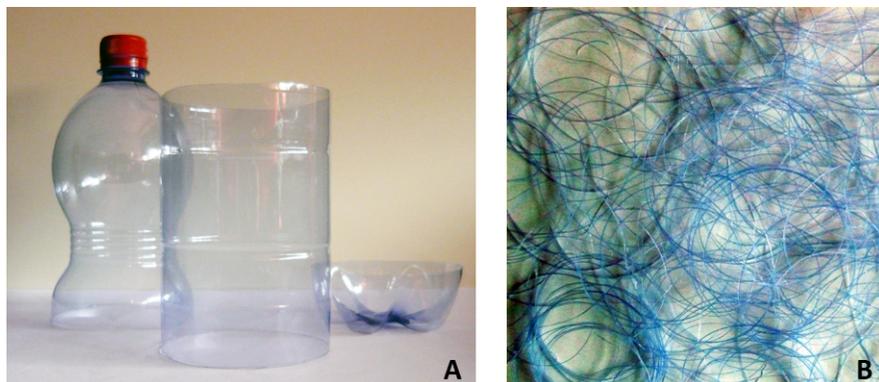
El procedimiento se adecúa a cada tipo de residuo empleado, fundamentalmente en la forma de distribución de la materia, pudiéndose dividir en tres grupos.

#### Fibras obtenidas de hojas delgadas (envases post-consumo)

Hasta que no se alcanzaron sistemas de corte mecánico satisfactorios la producción de estas fibras se realizó en forma manual. La secuencia de tareas para obtener fibras de este tipo de residuos fueron:

- ✓ quitar la parte superior e inferior de los envases por lo explicado en el punto 3.1.6.1. en cuanto a tomar muestras homogéneas del material (Figura 3.38 A),
- ✓ con tijeras o cizalla producir tiras de  $1 \pm 0,5$  mm de espesor (Figura 3.38 B),
- ✓ con tijeras o cizalla cortar dichas tiras en partículas del largo requerido.

Figura 3.38 - Corte manual de envases post-consumo. Botella de bebida gasificada. A – obtención de sector homogéneo; B – tiras de  $1 \pm 0,5$  mm



### Fibras obtenidas de elementos lineales (multifilamentos y fibra óptica)

En estos materiales los cortes solamente se requieren para la adecuación de la longitud a las necesidades de cada muestra. Los mismos se realizaron mediante la cizalla descrita en el punto 3.2.11.1, colocando un tope guía para cada longitud requerida, que permitió sistematizar el corte.

### Fibras obtenidas de cilindros huecos o tubos de sección circular.

Partiendo de 1,0 m a 1,2 m de longitud, que corresponde a la obtenida como viable en la tarea de separación de los materiales del cableado, en el caso de las fibras de sección entera se procedió a ajustar las longitudes con el mismo procedimiento que las fibras anteriores, con cortes mediante cizalla.

En las fibras de cuarta parte de sección, previamente a la adecuación de la longitud se realizó el corte en cuartos mediante instrumento descrito en el punto 3.2.11.1.

### 3.3.1.2 Sistema de corte mecanizado

Este sistema de corte se buscó obtenerlo a través de equipos existentes en el mercado y con costos mínimos, de manera que su adquisición no platee una gran inversión ni un incremento en el valor de las fibras producidas con materiales residuales.

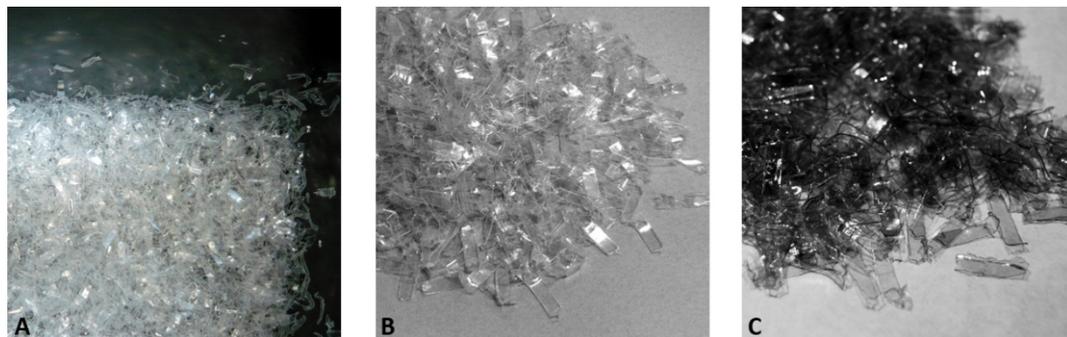
Se realizaron pruebas con distintas herramientas de corte, llegándose a obtener los mejores resultados con los equipos de destrucción de documentos que admiten clips y destruyen también discos compactos.

Asimismo, se ha buscado que el tamaño de partícula producido fueran lo más pequeñas posibles y con una relación de aspecto adecuadas. Para ello se trabajó con tres equipos distintos, como se detalló en el punto 3.2.11.2, que corresponden a niveles de seguridad en las partículas finales de documentos.

Estos equipos fueron eficaces solamente en materiales con características de película por lo cual se han utilizado solamente en los materiales provenientes de envases-post consumo. Asimismo, la eficacia alcanzada varía según el tipo de envase: corte de 95% del material en envases de bebidas carbonatadas (P-C), 50% en envases de bebidas sin carbonatar (P-NC) y 0% en envases de polietileno de alta densidad (HDPE-L). La secuencia de tareas para obtener fibras de este tipo de residuos fueron:

- ✓ quitar la parte superior e inferior de los envases por lo explicado en el punto 3.1.6.1. mediante corte manual,
- ✓ se realizó corte longitudinal de forma de abrir el tubo obtenido y transformarlo en una lámina,
- ✓ la lámina es introducida en la destructora de documentos, de igual forma que una hoja de papel, accionándose automáticamente el sistema de corte de la misma obteniendo así las partículas (Figura 3.39).
- ✓ se realizó una clasificación manual de las partículas obtenidas (Figura 3.39).

Figura 3.39 - Partículas obtenidas con destructora de documentos United Office, 4 x 18 mm<sup>2</sup>  
A – Partículas en destructora; B- Partículas clasificadas P-NC; C – Partículas clasificadas P-C.



### 3.3.2 Caracterización de fibras

#### 3.3.2.1 Densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente se utilizó el método B indicado en la Norma UNE-EN ISO 1183-1:2004 [11], Método del Picnómetro Líquido para plásticos no celulares.

Se utilizó una balanza con exactitud de 0,1 mg, el picnómetro indicado en el punto 3.2.3, y como líquido de inmersión Etanol según características dadas en el punto 3.1.5.4. El uso de este líquido responde a que algunas fibras tienen una densidad menor al agua.

Para cada material se utilizaron 5 muestras de masa comprendida entre 1 g y 5 g, y en cada una se realizó el siguiente procedimiento:

- ✓ se pesó el picnómetro vacío y seco, tarando con ese valor la balanza,
- ✓ se pesó la cantidad de material plástico dentro del picnómetro
- ✓ se completó el volumen del picnómetro con el líquido de inmersión, etanol, se le extrajo el aire por agitación y se determinó su peso,
- ✓ se vació y se secó el picnómetro, llenándolo nuevamente con líquido de inmersión
- ✓ se quitó el aire por agitación y se pesó el picnómetro con el líquido de inmersión para determinar su densidad teniendo como dato el volumen del picnómetro
- ✓ se calculó la densidad  $\rho_s$  de la muestra, en gramos por centímetro cúbico, a temperatura de laboratorio ( $20 \pm 1$  °C), utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{m_s \times \rho_{1L}}{m_1 - m_2} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

$m_s$  es la masa aparente de la muestra, en gramos;

$m_1$  es la masa aparente del líquido necesario para llenar el picnómetro vacío, en gramos;

$m_2$  es la masa aparente del líquido necesario para llenar el picnómetro que contiene la muestra;

$\rho_{ll}$  es la densidad del líquido de inmersión determinada, en gramos por centímetro cúbico.

Se determinó el valor como la media entre las muestras de cada material.

### 3.3.2.2 Relaciones dimensionales

Partiendo de las dimensiones de las fibras, de sección y longitud, se determinaron relaciones dimensionales que nos permiten definir si cumplen con los parámetros mínimos indicados en la bibliografía por distintos autores.

En las fibras de sección circular, a partir de la medición de su diámetro ( $\phi$ ) y longitud (L) con los elementos descritos en el punto 3.2.4, se calculó la esbeltez ( $\lambda$ ) como:

$$\lambda = \frac{L}{\phi} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde  $\phi$  y L debe estar en iguales unidades, en este caso mm.

Al existir secciones no circulares, para ellas se debió obtener un diámetro equivalente ( $\phi_e$ ) según procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 14889-2:2008 [12].

Para fibras con sección transversal rectangular, asimilables a ellas las fibras extraídas de envases post-consumo, la norma determina el diámetro equivalente como:

$$\phi_e = \sqrt{\frac{4 \cdot w \cdot t}{\pi}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

$\phi_e$  diámetro equivalente, en igual unidad que los otros parámetros

w ancho de la sección, en igual unidad que t

t espesor de la sección, en igual unidad que w

En las fibras de sección circular hueca, FP-FO, se emplearon los dos procedimientos. En las fibras con sección entera se determinó la esbeltez con el diámetro mayor (Ecuación 3.2); en las secciones con la cuarta parte de la original, se asimiló a secciones transversales rectangulares (Ecuación 3.3).

### 3.3.2.3 Resistencia a Tracción

La resistencia a tracción se determinó, primero, con el módulo de micro-ensayos Microtest descrito en el punto 3.2.13.2. La velocidad utilizada fue la máxima permitida por el equipo, 0,4 mm/min. Asimismo, este equipo limita la longitud total de fibras a 40 mm, dejando una distancia libre entre mordazas mínima de 10 mm y máxima de 20 mm, condicionantes claves en el momento de preparar las muestras.

Estas condiciones no permitieron seguir estrictamente los requerimientos normativos, adecuando la longitud y forma a la características del equipo con la utilización de probetas no proporcionales, según definición de la Norma UNE-EN ISO 6892-1:2010 [13]. Asimismo esta norma establece el método de ensayo a tracción que la Norma UNE-EN 14889-2:2008 [12] indica para fibras poliméricas.

Las adecuaciones incluye, por ejemplo, que en las fibras obtenidas de hojas delgadas (envases post-consumo) para adaptar la muestra a las características del equipo, en forma de halterio como se indicó en el punto 3.1.6.2, la longitud calibrada es igual a la luz entre mordazas. En las fibras obtenidas de elementos lineales y tubulares la longitud de fibra se limitó a 40 mm en vez de los 100 mm ó más solicitados por normativa.

Asimismo, en las fibras de elementos lineales, se protegió las zonas de amarre por posibles roturas en el momento de ajustar las mordazas dentadas.

A continuación se detalla el procedimiento seguido para este ensayo:

- ✓ se seleccionaron 5 fibras de cada material a estudiar,
- ✓ se marcó en forma indeleble, en la parte central de la fibra, los 10 mm correspondientes a la distancia entre mordazas
- ✓ se determinó la sección en base a las medidas de las mismas,
- ✓ se colocaron en la prensa ajustando las mordazas
- ✓ se calibró el software y se inició el ensayo, deteniéndose automáticamente en el momento de rotura de la fibra o cuando alcanzó el 100% de extensión.
- ✓ se determinó la tensión máxima en cada fibra como:

$$\sigma_{Tf} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{S_F} \qquad \text{Ecuación 3.4}$$

donde

- $\sigma_{Tf}$  tensión máxima a tracción de cada fibra, en MPa
- $F_{m\acute{a}x}$  fuerza máxima obtenida en el ensayo, en N
- $S_f$  sección de la fibra, en  $\text{mm}^2$

- ✓ se determinó la tensión máxima del material ensayado ( $\sigma_{Tm\acute{a}x}$ ) como el valor medio de los valores obtenidos en el punto anterior.

Con este equipo se pudo realizar un seguimiento visual amplificado por su colocación en el microscopio óptico permitiendo observar la deformación de la fibra y verificar el correcto desarrollo del mismo.

Se obtuvieron vídeos e imágenes a través del software correspondiente como se pueden apreciar en la Figura 3.40 la secuencia de la deformación que sufren las fibras P-NC o en la Figura 3.41 el fallo en la mordaza derecha de las primeras fibras ópticas ensayadas sin protección en el extremo.

Figura 3.40 - Ensayo de tracción a fibras P-NC. Secuencia de deformación.

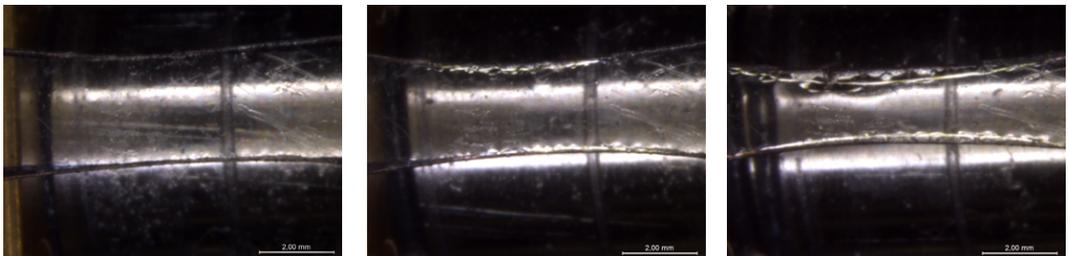
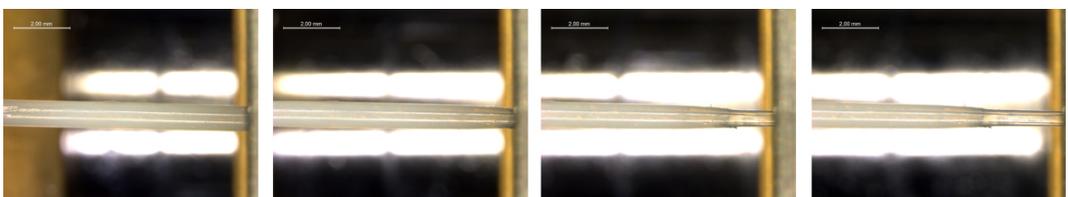


Figura 3.41 - Ensayo de tracción a fibra óptica, FO. Secuencia de deformación.



En segundo lugar estos ensayos se continuaron con el dinamómetro descrito en el punto 3.2.13.3. Para poder obtener los datos necesarios para la gráfica tensión/deformación, se adaptó este equipo a la prensa Instron indicada en el punto 3.2.13.1, con las piezas diseñadas y elaboradas para tal fin, de forma de realizar el ensayo a una velocidad conocida y constante.

Para coordinar los resultados obtenidos con ambos equipos se mantuvieron las características dimensionales de las fibras y se realizaron comprobaciones de las variaciones que podían surgir. En aquellas fibras que se encontraron variaciones mayores al 5% se las ensayo nuevamente tomándose las últimas medidas como valores de resistencia.

Después de realizadas las verificaciones correspondientes, la velocidad de ensayo utilizada fue de 1 mm/min, siendo la única característica que se modificó en el procedimiento del ensayo.

Producto del espacio limitado entre mordazas la deformación se obtuvo por el desplazamiento de las mismas.

#### 3.3.2.4 Módulo Elástico

Partiendo de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción se calcularon los valores de tensión ( $\sigma_T$ ) y alargamiento ( $\varepsilon$ ) aplicando las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_T = \frac{F_T}{S_F} \qquad \varepsilon = \frac{L_f}{L_0} \qquad \text{Ecuaciones 3.5 y 3.6}$$

donde,

$\sigma_T$  es la tensión en MPa,

$F_T$  es la fuerza de tracción en N,

$S_F$  es la sección de la fibra en mm<sup>2</sup>,

$\varepsilon$  es el alargamiento en mm/mm,

$L_f$  es la longitud final entre marcas de la fibra en mm,

$L_0$  es la longitud inicial entre marcas de la fibra en mm.

Siguiendo el procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 14889-2:2008 [12] el módulo de elasticidad se calculó utilizando la tensión y la deformación al 10% y al 30% de tensión máxima ( $\sigma_{Tm\acute{a}x}$ ) según la ecuación:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot 0,001 \quad \text{Ecuación 3.7}$$

donde,

- $E$  es el módulo de elasticidad en GPa
- $\sigma_1$  es la tensión al 10% de la tensión máxima en MPa
- $\sigma_2$  es la tensión al 30% de la tensión máxima en MPa
- $\varepsilon_1$  es la deformación correspondiente a  $\sigma_1$  en mm/mm
- $\varepsilon_2$  es la deformación correspondiente a  $\sigma_2$  en mm/mm

Estos valores obtenidos no son exactos, se determinaron a los efectos de realizar una comparación de magnitudes entre las diversas fibras y con el módulo de la matriz obtenido en la bibliografía.

Esto se debe a que en la parte elástica de la curva carga tensión-deformación, el valor de la pendiente puede no representar necesariamente el módulo de elasticidad. Consigue ser bastante similar si se utilizan condiciones óptimas en el ensayo (extensómetros calibrados con alta resolución y a doble cara, etc.) que, como se mencionó anteriormente, no es la situación al medir la deformación por el movimiento del pistón a través del software de la prensa y dinamómetro.

### 3.3.3 Durabilidad

#### 3.3.3.1 En soluciones alcalinas

##### Hidróxido de Sodio

Para producir un medio altamente alcalino se utilizó una disolución uno molar de Hidróxido de Sodio (1 M NaOH) con un pH = 14.

Empleándose un bote para cada tipo de fibra se colocaron 2 g de las mismas en 40 ml de solución, permaneciendo sumergidas en este medio durante 15 días a temperatura ambiente del Laboratorio (Figura 3.42).

Finalizado el período se extrajeron 5 fibras de cada tipo, se lavaron con suficiente agua destilada y secaron para poder ser visualizadas mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).

Figura 3.42 - Fibras inmersas en solución de hidróxido de sodio 1 molar



Antes de la visualización las fibras se adhirieron con cinta adhesiva de doble cara a porta-muestras y se metalizaron las superficies empleando oro, por el alto contenido de carbono en las fibras, con el equipamiento y procedimiento descrito en el punto 3.2.8.

### Hidróxido Cálcico

De igual manera que en la disolución anterior, se utilizó un bote para cada fibra y en ellos se colocaron 50 ml de agua e hidróxido cálcico hasta obtener una disolución saturada con una pequeña cantidad de sólido en exceso, a temperatura ambiente de Laboratorio ( $20 \pm 1$  °C).

Las fibras permanecieron en esta disolución 28 días a temperatura ambiente del Laboratorio, posteriormente se lavaron con abundante agua destilada y se secaron para pegarlas en porta-muestras como en disolución anterior. Antes de la visualización en el SEM se metalizó la superficie con oro.

## Cemento Pórtland

Se empleó igual procedimiento que con la disolución saturada de hidróxido cálcico empleando cemento Pórtland. Como se aprecia en la Figura 3.43 para que las fibras no tuvieran contacto con el material precipitado se las dejó suspendidas de la parte superior del bote.

Figura 3.43 - Fibras P-C en disolución saturada de cemento Pórtland.



### 3.3.3.2 En pastas

#### Hidróxido Cálcico

En los estudios de degradación de las fibras se ha utilizado una pasta elaborada con hidróxido cálcico de pureza comprendida entre el 95% y el 100% y agua, en una relación 1:1. A esta pasta se le introdujeron las fibras de un largo tal que quedara parte de su longitud fuera de la misma (Figura 3.44)

Figura 3.44 – Fibras P-C en pasta de hidróxido cálcico.



A los botes con este contenido se los mantuvo en baño a 60 °C durante 15 días. Transcurrido ese período se lavaron con abundante agua destilada y se secaron para pegarlas en porta-muestras del SEM. Antes de la visualización se metalizó la superficie con oro según lo descrito en el punto 3.2.8.

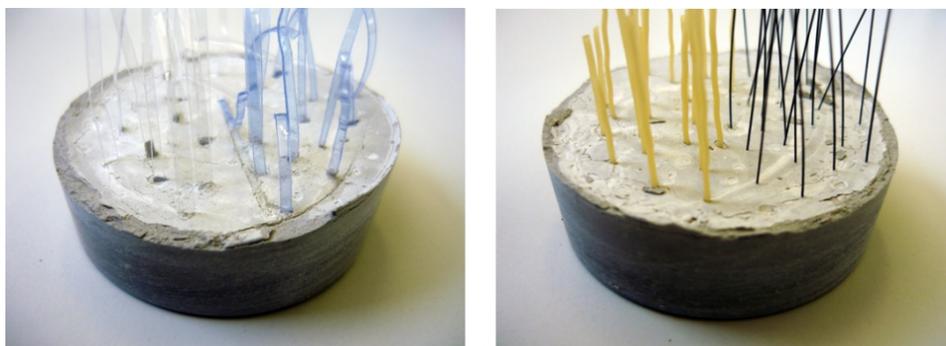
### Cemento Pórtland

Estas pastas fueron realizadas con cemento Pórtland CEM I-52,5R indicado en el punto 3.1.1 con relación agua/cemento 0,5, igual a la que se empleará en la elaboración de morteros.

Para su elaboración se colocó el cemento en un recipiente, se le agregó el agua correspondiente y se amasó manualmente durante 2 minutos.

Posteriormente se realizó el vertido de la pasta en botes hasta una altura de 1 cm, aproximadamente, se la compactó manualmente y se introdujeron las fibras de un largo tal que quedara parte de su longitud fuera de la pasta (Figura 3.45).

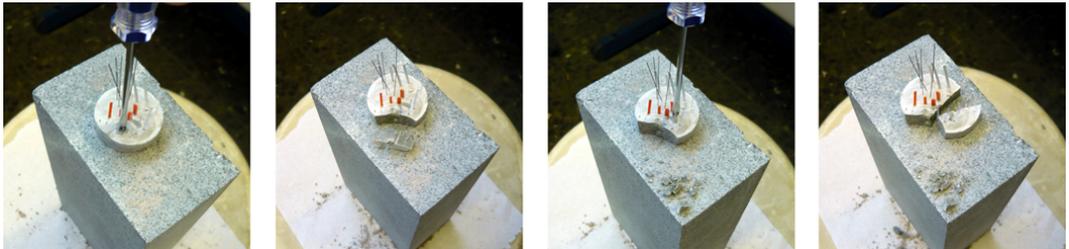
Figura 3.45 - Fibras en pasta de cemento Pórtland.  
Fibras P-NC y P-C (izquierda); Fibras PP-E y P-MF (derecha)



A la edad de curado escogida se retiraron las fibras de la pasta, de forma de no afectar su superficie con el procedimiento empleado.

Para ello se utiliza un elemento de cabeza plana al cual se golpea en las zonas de pasta que quedan entre las fibras a modo de entalla (Figura 3.46). Al generar las fibras una discontinuidad en la masa la rotura se produce dejando su superficie a la vista.

Figura 3.46 - Proceso de extracción de fibras de pastas de cemento Pórtland.



Las fibras extraídas, en general, fueron lavadas con una disolución de ácido clorhídrico diluido, luego con abundante agua destilada y secadas con toallas de papel.

Posteriormente se pegaron en porta-muestras del SEM y se metalizó la superficie con oro según lo descrito en el punto 3.2.8.

### Mixtas

Estas pastas fueron realizadas con cemento Pórtland CEM I-52,5R y las puzolanas indicadas en el punto 3.1.4 con relación agua/binder 0,5, igual a la empleada en las pastas de cemento Pórtland.

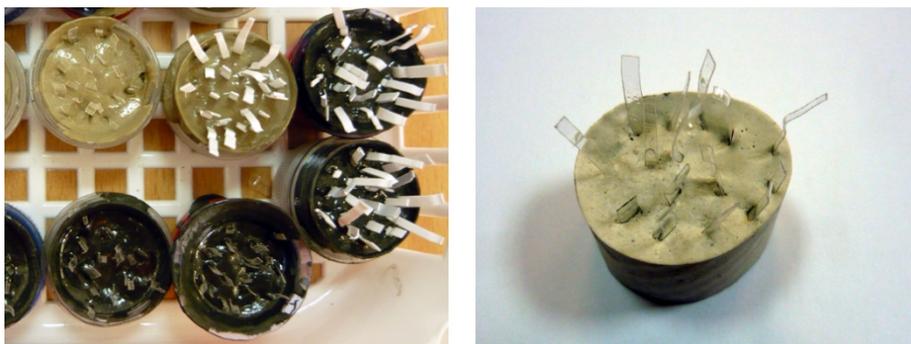
Las puzolanas sustituyeron 20% y 50% del cemento Pórtland según lo especificado en las experiencias correspondientes del Capítulo 4.

Para su elaboración se colocó la puzolana y el agua en un recipiente mezclándose manualmente durante 2 minutos. A continuación se agregó el cemento y se mezcló durante 2 minutos más.

Posteriormente se realizó el vertido de la pasta en pequeños recipientes de 1 cm de altura, aproximadamente, compactándolos manualmente y se introdujeron las fibras de un largo tal que quedara parte de su longitud fuera de la pasta (Figura 3.47).

A la edad de curado escogida se retiraron las fibras de la pasta con el mismo procedimiento desarrollado para pastas de cemento Pórtland.

Figura 3.47 – Fibras en pastas mixtas.  
Fibras P-NC y HDPE-L (izquierda); Fibras P-C (derecha)



### 3.3.3.3 Envejecimiento controlado

Este procedimiento refiere a aquellas muestras que, para visualizar el grado de deterioro a largo plazo, luego de realizado un curado de 24 horas en Cámara Húmeda (temperatura  $20 \pm 1$  °C y humedad relativa  $\geq 90\%$ ) sometidas a un proceso de envejecimiento controlado sumergiendo los botes en agua caliente.

Las temperaturas empleadas fueron de 45 °C y 60 °C como se indica en el Capítulo 4 para cada experiencia. El tiempo de inmersión durante un período de 15 días.

Una vez transcurrido este período de tiempo se retiraron las fibras de la pasta, se lavaron y observaron mediante SEM con igual procedimiento al explicado anteriormente.

### 3.3.3.4 Evolución de la resistencia a tracción

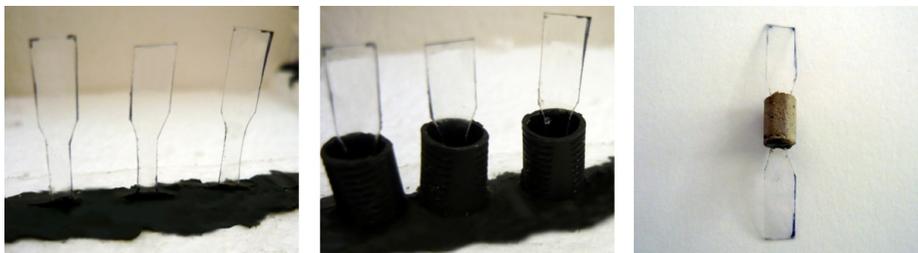
Este procedimiento es una adaptación al desarrollado en la Norma UNE-EN 14649:2006 [14] para la determinación de la resistencia remanente de las fibras de vidrio en cemento y el hormigón (ensayo SIC).

Se realizó para fibras P-NC y, por sus características, se ha utilizado muestras en forma de halterio como se expuso en el punto 3.1.6.2 (Figura 3.9). La matriz utilizada fue de cemento Pórtland.

Dadas las dimensiones de las fibras se colocó matriz cementicia en los 10 mm centrales correspondientes a la longitud calibrada, con el siguiente procedimiento:

- ✓ se realizaron incisiones de 15 mm de profundidad, aproximadamente, en una plancha de poliestireno expandido de 25 mm de altura que oficia como base,
- ✓ se introdujeron en ellas 80 fibras en posición vertical,
- ✓ se colocó una capa de plastilina en la zona de contacto entre la base y las fibras, de 1 mm de espesor y 1 cm de ancho, aproximadamente (Figura 3.48 izquierda)
- ✓ se enhebraron las fibras en tubos de goma de 1 cm de diámetro, previamente lubricados, y se selló su base con la misma plastilina (Figura 3.48 central)
- ✓ se preparó la pasta cementicia y mediante una jeringa de 100 ml se inyectó en los cilindros de forma que no quedara aire en su interior
- ✓ a 24 horas de curado en cámara húmeda (temperatura  $20 \pm 1$  °C y humedad relativa  $\geq 90\%$ ) se desmoldaron (Figura 3.48 derecha)
- ✓ se continuó el curado en cámara húmeda hasta los 28 días,
- ✓ 5 muestras de cada matriz se seleccionaron para ensayar a esta edad. Se les quitó la matriz a través de una entalla realizada en una directriz paralela al espesor de la fibra y ensayaron a tracción.
- ✓ 60 muestras de cada matriz se introdujeron en baño de 45 °C continuando su curado en esas condiciones por 5, 10, 15, 20, 30 y 35 días. Transcurridos los días de curado en baño correspondientes se retiró la matriz con igual procedimiento y se ensayaron a tracción.
- ✓ 15 muestras con matriz de cemento Pórtland se les continuó el curado en cámara húmeda, habiéndose ensayado 5 a una edad de 14 meses.

Figura 3.48 - Proceso de llenado localizado de matriz cementicia en fibras tipo halterio.



### 3.3.3.5 Estudio termogravimétrico de pastas

A la edad de curado escogida para realizar este ensayo se extrae una muestra y se muele en un mortero de ágata con acetona, para detener el proceso de hidratación. Esta muestra se filtra y se seca durante 15 minutos en una estufa a 60 °C. Posteriormente se pasa por el tamiz 125  $\mu\text{m}$  para obtener material suficiente para la muestra de ensayo.

En general, las condiciones utilizadas para este análisis fueron:

- ✓ Intervalo de calentamiento de 35-600 °C.
- ✓ Velocidad de calentamiento 10 °C/min
- ✓ Crisol de aluminio de 100  $\mu\text{L}$  sellable con orificio en la tapa para atmósfera autogenerada.
- ✓ Atmósfera inerte de  $\text{N}_2$  seco
- ✓ Flujo de  $\text{N}_2$  de 75 mL/min

Del mismo se obtienen las curvas TG y DTG con los porcentajes correspondientes a la pérdida de masa total y a la pérdida de masa que tiene lugar en el intervalo de temperatura 520-600 °C correspondiente a la deshidroxilación del CH.

En particular, se han cambiado las condiciones de ensayo para determinar si la muestra estaba carbonatada. En ese caso fueron:

- ✓ Intervalo de calentamiento de 35-1000 °C
- ✓ Velocidad de calentamiento 20 °C/min
- ✓ Atmósfera de aire seco y flujo de 75 mL/min
- ✓ Crisol de alúmina de 70  $\mu\text{L}$

### 3.3.4 Análisis de interfaz

#### Muestras para SEM

Para realizar la observación de la interfaz fibra/matriz mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) se prepararon dos tipos de muestras.

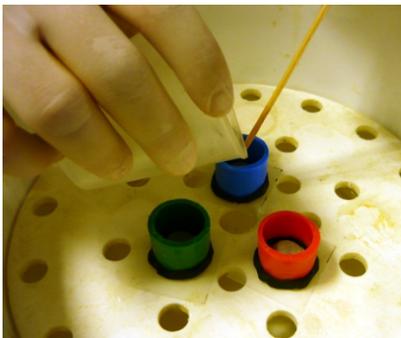
Las primeras se elaboraron con pasta de cemento Pórtland CEM I-52,5R con una relación agua/cemento 0,5, en moldes cilíndricos de 2,0 cm de diámetro y 2 cm de altura.

Las muestras de P-NC y P-C utilizadas se cortaron de mayor tamaño que las fibras, 1,5 cm de ancho y 2,5 cm de altura para colocar tres de ellas en cada cilindro, en forma paralela a la altura. Estas muestras se curaron 24 horas en cámara húmeda, se desmoldaron y se continuó el curado en las mismas condiciones hasta los 28 días. A esa edad se procedió a embutirlas en resina Epofix utilizando moldes cilíndricos de 2,5 cm de diámetro y 2,0 cm de altura. (Figura 3.49).

La resina utilizada es para impregnación al vacío marca Struers, en frío, especialmente recomendada para muestras porosas y con un tiempo de endurecimiento de 8 horas. Durante ese tiempo se mantuvo en vacío para quitar cualquier burbuja de aire que se pudiera producir. Una vez endurecida la resina, se procedió a desmoldarla y se pulió con distintos abrasivos hasta obtener una superficie plana.

Posteriormente se metalizó la superficie de observación con oro para realizar el análisis mediante SEM (Figura 3.49).

Figura 3.49 - Muestras embutidas en resina epoxi.  
Pasta de cemento Pórtland y fibras P-NC.



Las segundas se elaboraron por medio de corte con la sierra circular de sobre-mesa descrita en el punto 3.2.12. El material base fueron los descartes de placas de mortero de cemento Pórtland reforzado con fibras provenientes de envases post-consumo, y de él se extrajeron muestras de  $1 \times 1 \times 0,5 \text{ cm}^3$ , aproximadamente (Figura 3.50)

Figura 3.50 - Muestras cortadas con sierra circular de sobre-mesa



Estas muestras se sumergieron en acetona y una vez evaporada la misma, se secaron en estufa durante 15 minutos. Posteriormente se pegaron con cinta adhesiva doble faz en una base de acero de 2,5 cm de diámetro y se metalizó la superficie para su posterior análisis mediante SEM.

### Moldes prismáticos especiales

Este tipo de muestras se elaboró para obtener pastas de 2,5 mm de espesor que estuvieran en contacto con P-NC en sus dos caras mayores.

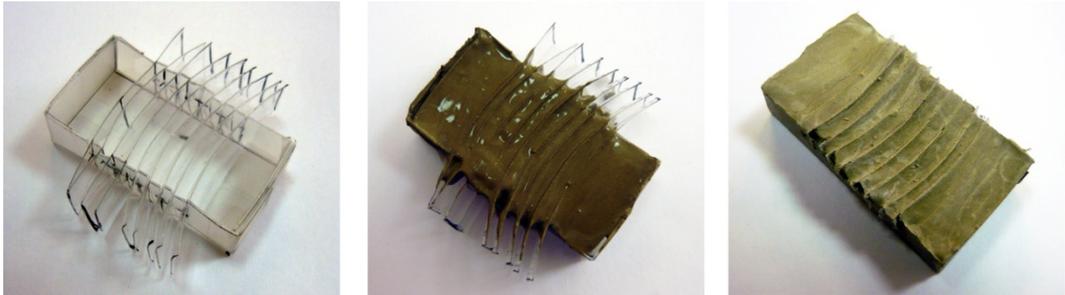
Para ello se elaboraron moldes en acetato de  $2 \times 4 \times 0,5 \text{ cm}^3$  con unas incisiones en sus caras longitudinales que permiten colocar muestras de PET de 0,5 cm de altura y 3,5 cm de longitud separadas cada 0,25 mm en el lado longitudinal como se puede observar en la Figura 3.51.

Posteriormente se preparó pasta de cemento Pórtland, relación agua/cemento 0,5 y se la vertió en el molde completando los espacios sin PET. Después de 24 horas en cámara húmeda ( $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura y humedad  $\geq 90\%$ ) se procedió al desmoldado y se continuó el curado en las mismas condiciones hasta los 28 días (Figura 3.51).

Finalizado ese período, se extrajo la pasta contenida entre dos muestras de PET, de 2,5 mm de espesor, se molió en un mortero de ágata con acetona, para detener el proceso

de hidratación, filtró y secó durante 15 minutos en una estufa a 60 °C. Posteriormente se pasó por el tamiz 125  $\mu\text{m}$  para obtener material suficiente para realizar el ensayo termogravimétrico, como se mencionó en el punto 3.3.3.5.

Figura 3.51 - Moldes prismáticos especiales.  
Pasta de cemento Pórtland con muestras de PET.



### Pull-out muestras simples

En este ensayo se utilizaron fibras P-NC de 1 mm de ancho y longitudes de 6 mm, 12 mm y 20 mm embebidas en la muestra de mortero plástico de cemento Pórtland, con relación agua/cemento 0,5 y 7 días de curado en cámara húmeda a una temperatura de  $20 \pm 1$  °C y humedad  $\geq 90\%$ .

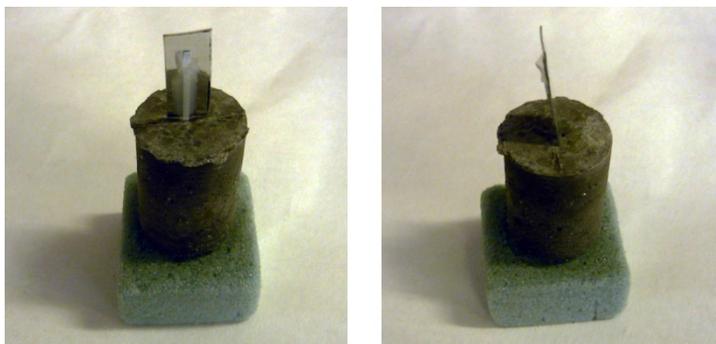
Asimismo se ensayaron fibras de igual material, 1 mm de ancho y longitudes de 12 y 20 mm, embebidas en igual tipo de mortero e iguales condiciones de curado, a edad de 28 días.

En la elaboración de muestras (Figura 3.52) se utilizaron los moldes descritos en el punto 3.2.9.3 basados en la investigación realizada por el equipo de Singh [9] con fibras de polipropileno. El procedimiento para esta elaboración consistió en:

- ✓ elaborar el mortero plástico, relación tres partes de arena, una de cemento y media de agua, relación agua/cemento 0,5
- ✓ llenar con el mismo la mitad de la altura del molde y compactar manualmente con 10 golpes sobre una base rígida haciéndolo caer desde una altura de 2 cm, aproximadamente
- ✓ colocar la fibra centrada ayudada por soporte diseñado para tal fin (Figura 3.23)

- ✓ completar con mortero hasta la altura total del molde y compactar manualmente con 10 golpes sobre base rígida haciéndolo caer desde una altura de 2 cm, aproximadamente
- ✓ curar 24 horas en cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °C y humedad  $\geq 90\%$ ) antes de desmoldar
- ✓ continuar curado en iguales condiciones hasta edad de ensayo

Figura 3.52 - Muestras para ensayo pull-out simple.



Transcurrido el tiempo de curado se procedió al ensayo utilizando el dinamómetro especificado en el punto 3.2.13.3, con velocidad conocida y constante lograda por la adaptación del mismo a la prensa Instron.

El procedimiento consistió en:

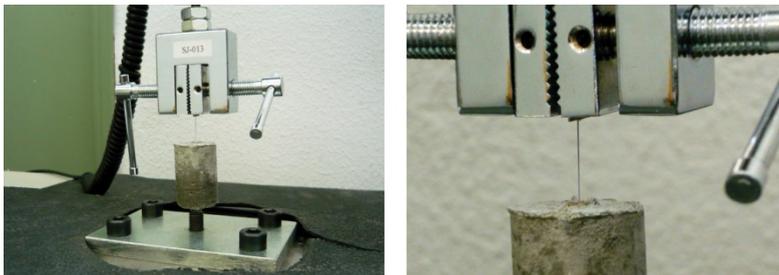
- ✓ sujetar la muestra al bastidor mediante roscado del perno incorporado en la pieza de adaptación diseñada para tal fin (Figura 3.34)
- ✓ ajustar la altura del pistón a la muestra de forma que la mordaza se aproxime lo máximo posible sin ejercer presión en la misma
- ✓ sujetar la fibra con la mordaza (Figura 3.53)
- ✓ iniciar el software del dinamómetro e inmediatamente iniciar el movimiento de la prensa con velocidad de aplicación de la fuerza fue de 1 mm/min.

- ✓ finalizar el ensayo cuando la medición de fuerza es cero, por arrancamiento o rotura de la fibra (Figura 3.54)

Figura 3.53 - Pull-out muestra simple. Situación inicial.



Figura 3.54 - Pull-out muestra simple. Situación final.



### Pull-out muestras dobles

En este ensayo las fibras utilizadas fueron obtenidas por sistema de corte mecánico, de  $4 \pm 0,5$  mm x  $50 \pm 5$  mm, y embebidas en la muestra de mortero plástico de cemento Pórtland, con relación agua/cemento 0,5 y 28 días de curado en cámara húmeda a una temperatura de  $20 \pm 1$  °C y humedad  $\geq 90\%$ .

En la elaboración de muestras (Figura 3.55) se utilizaron los moldes descritos en el punto 3.2.9.3 basados en igual principio que en los moldes simples. El procedimiento para esta elaboración consistió en:

- ✓ colocar fibra en incisión realizada en el centro de dos placas de acetato de 3,1 x 2,8 cm<sup>2</sup>
- ✓ armar el molde con dichas placas en la ranura central (Figura 3.56)
- ✓ elaborar el mortero plástico, relación tres partes de arena, una de cemento y media de agua, relación agua/cemento 0,5
- ✓ llenar con el mismo el molde y compactar con mesa vibradora descrita en el punto 3.2.10.3.
- ✓ curar 24 horas en cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °C y humedad  $\geq 90\%$ ) antes de desmoldar
- ✓ continuar curado en iguales condiciones hasta edad de ensayo.

Figura 3.55 - Pull-out muestra doble



Figura 3.56 - Pull-out doble. Colocación de fibra.



Transcurrido el tiempo de curado se procedió al ensayo utilizando el dinamómetro especificado en el punto 3.2.13.3, con velocidad conocida y constante lograda por la adaptación del mismo a la prensa Instron.

El procedimiento consistió en:

- ✓ sujetar la muestra al bastidor mediante roscado del perno incorporado en la pieza de adaptación diseñada para tal fin y al dinamómetro por un acople roscado (Figura 3.57) ajustando previamente la altura del pistón a la muestra de forma que se aproxime lo máximo posible sin ejercer presión en la misma,
- ✓ iniciar el software del dinamómetro e inmediatamente iniciar el movimiento de la prensa con velocidad de aplicación de la fuerza fue de 1 mm/min.
- ✓ finalizar el ensayo cuando la medición de fuerza es cero, por arrancamiento o rotura de la fibra (Figura 3.58).

Figura 3.57 - Pull-out muestra doble. Situación inicial.

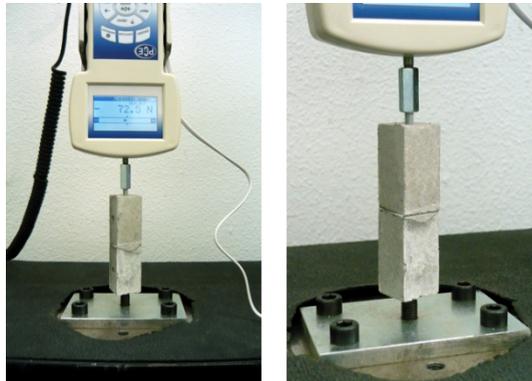
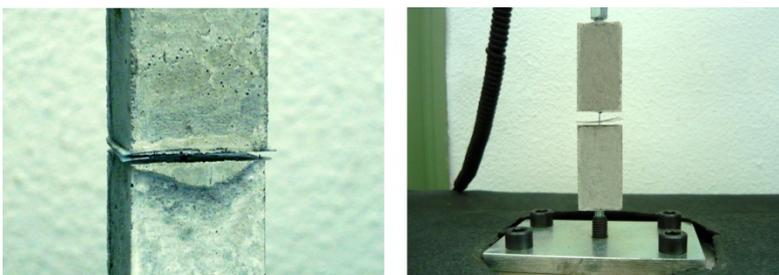


Figura 3.58 - Pull-out muestra doble. Situación antes de la rotura.



Este molde si bien ha sido pensado para una muestra doble, es apto para realizar en mejor forma las muestras para pull-out simple (llenando solamente un compartimento) así como para muestras de morteros fibro-reforzados para ensayos de tracción. En este

caso se debería realizar entallas con sierra circular para garantizar una sección más débil a mitad de altura.

### 3.3.5 Amasado de morteros

En la elaboración y procedimiento de amasado del mortero de cemento Pórtland se contempló lo especificado en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [6].

En las muestras control o cuando las fibras se utilizaron como adición, 2% del volumen total, la composición en masa fue una parte de cemento, tres partes de arena normalizada y media parte de agua (relación agua/cemento 0,50). En estos casos cada amasada para tres probetas 40 x 40 x 160 cm<sup>3</sup>, o cuatro de 25 x 25 x 287 mm<sup>3</sup>, estuvo compuesta de (450 ± 2) g de cemento, (1350 ± 5) g de arena y (225 ± 1) g de agua.

Cuando para incorporar las fibras se tuvo que sustituir por el mismo volumen en árido, 4% y 6% del volumen total, la composición de la masa mantuvo los (450 ± 2) g de cemento y (225 ± 1) g de agua, determinándose la cantidad de árido a utilizar y expuesto en la Tabla 3.10, así como la cantidad de fibra necesaria en cada dosificación.

Tabla 3.10 - Dosificaciones de morteros fibro-reforzados para una amasada.

<b>porcentaje de fibra</b> (en volumen total)	<b>2%</b>	<b>4%</b>	<b>6%</b>
<b>masa</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>
<b>árido</b>	1350	1255	1208
<b>cemento/binder (*)</b>	450	450	450
<b>agua</b>	225	225	225
<b>P-NC</b>	23,1	46,2	69,3
<b>P-C</b>	23,6	-----	-----
<b>P-MF</b>	19,5	39,0	58,5
<b>PV-MF</b>	28,2	-----	-----
<b>PT-MF</b>	11,0	-----	-----
<b>HDPE-L</b>	16,9	-----	-----
<b>PP-E</b>	29,4	-----	-----
<b>FO</b>	19,4	-----	-----
<b>FP-FO</b>	25,1	-----	-----

(\*) en morteros mixtos el porcentaje de puzolana corresponde a una sustitución en peso de cemento.

Para cada amasada de placas estas cantidades se multiplicaron por el factor correspondiente a los volúmenes de los diferentes moldes.

El procedimiento de amasado varía dependiendo de si se realiza un mortero control, sin fibras, o mortero fibro-reforzado. Para los morteros control el procedimiento es el siguiente:

- ✓ se vierte el agua y el binder dentro del recipiente, teniendo cuidado para evitar pérdidas de agua o de cemento; en caso de morteros mixtos la puzolana se debe homogeneizar con el cemento previamente e incorporarse en este punto.
- ✓ inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el binder, se pone en marcha la amasadora a velocidad lenta iniciándose los tiempos de amasado.
- ✓ después de 30 s de amasado, se añade regularmente la arena durante los 30 s siguientes;
- ✓ se pone la amasadora a la velocidad rápida y se continúa el amasado durante otros 30 s;
- ✓ Se para la amasadora durante 90 s. En los primeros 30 s, se retira por medio de una espátula de goma o de plástico todo el mortero adherido a las paredes laterales y al fondo del recipiente y se coloca en el centro de la amasadora;
- ✓ Se continúa el amasado a velocidad rápida durante 60 s.

Para los morteros fibro-reforzados, habiendo probado distintos procedimientos, se observó que el momento más conveniente para incorporar la fibra es hacerlo en forma manual, en los últimos 30 s de reposo, antes del último período de amasado.

De este modo se obtiene una buena homogeneización del material compuesto y, dada la característica hidrófila de las mismas, se afecta mínimamente la trabajabilidad.

### 3.3.6 Llenado de moldes

Una vez finalizado el amasado se procede a rellenar el molde y compactar la mezcla mediante mesa de sacudidas o sistema de vibrado según corresponda.

El procedimiento tiene variaciones en función de los moldes utilizados, que se detallan a continuación.

### Moldes prismáticos lineales

Para estos moldes se siguió el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [6] mencionada al comienzo de este apartado, que consiste en:

- ✓ con el molde lubricado y tolva<sup>(\*)</sup> firmemente unidos a la mesa de la compactadora, se rellena en dos fases con una cuchara adecuada. En la primera se rellena homogéneamente hasta la mitad del molde y a continuación se compacta con 60 golpes.
- ✓ posteriormente se introduce la segunda capa de mortero, asegurándose de que hay excedente de mortero, y se compacta con otros 60 golpes.
- ✓ se retira con cuidado el molde de la mesa de sacudidas e inmediatamente se quita el exceso de mortero con una regla plana, manteniéndola casi vertical pero inclinada en la dirección del movimiento transversal de sierra, una vez en cada dirección
- ✓ se limpia el molde eliminando el mortero que haya quedado como consecuencia del enrasado y se coloca sobre él una lámina de vidrio de 21 x 18,5 x 0,6 cm<sup>3</sup>
- ✓ se etiqueta el molde para identificar la muestra y se introduce en cámara húmeda, con temperatura de  $20 \pm 1$  °C y humedad  $\geq 90\%$ , colocándolos en una superficie horizontal
- ✓ entre 20 h y 24 h después del enmoldado se realiza el desmolde, marcando cada probeta con lápiz o cera resistente al agua
- ✓ posteriormente las probetas se colocan horizontalmente o verticalmente bajo agua, y se mantienen en la cámara húmeda hasta la edad de curado escogida.

(\*) Tolva se utilizó solo para moldes de 40 x 40 x 160 cm<sup>3</sup> en mesa de sacudidas.

A este procedimiento se le realizó una variante en el sistema de compactado, utilizando mesa vibradora durante 30 segundos, para comparar la eficacia de los sistemas en cuanto a la homogeneidad del material, particularmente en lo que refiere al ascenso fibras. Con este sistema se obtuvieron mejores resultados.

### Moldes prismáticos superficiales para ensayo en una sola dirección.

Para este tipo de moldes no se encontró bibliografía que indicara el procedimiento de llenado por lo cual se realizó en base a experiencias anteriores realizadas en el ICITECH con placas de mortero reforzado con fibra de vidrio.

Para lubricar estos moldes se utilizó una capa fina de vaselina y el procedimiento de elaboración consistió en:

- ✓ asegurar el molde a la mesa vibratoria descrita en el punto 3.2.10.3, diseñada para la fabricación de tejas, utilizada por contar con un movimiento más suave que la mesa vibradora de hormigón;
- ✓ colocar el mortero con una cuchara en 5 puntos, 4 cuadrantes y uno central, para las placas de gran tamaño y en un punto para cada una de las pequeñas;
- ✓ comenzar el vibrado controlando que la distribución se realiza homogéneamente completando donde no se alcance la altura del molde;
- ✓ finalizar la vibración cuando dejan de producirse burbujas en la superficie, después de 60 s aproximadamente;
- ✓ retirar el molde de la mesa vibradora e inmediatamente quitar el exceso de mortero con una regla plana;
- ✓ limpiar el molde, cubrirlo con una placa de material impermeable y colocarlo en una superficie horizontal dentro de cámara húmeda, sin apilar los moldes;
- ✓ entre 20 h y 24 h después del enmoldado realizar el desmolde, marcando cada probeta con lápiz o cera resistente al agua
- ✓ posteriormente, colocarlas dentro de una bolsa de polietileno y pulverizarlas con agua y cerrar herméticamente para mantener las caras húmedas<sup>(\*)</sup>
- ✓ colocar en cámara húmeda, en forma vertical u horizontal, hasta la edad de curado escogida

(\*) Excepto las placas de  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  que se sumergieron en agua, recibiendo igual procedimiento de curado que las muestras prismáticas.

En placas de  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$  y  $40 \times 40 \times 2 \text{ cm}^3$ , 24 h previas a su ensayo, se procedió a extraer las muestras según dimensiones establecidas en la Norma UNE-EN 1170-4:1998 [7] de referencia:  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  y  $32,5 \times 5 \times 2 \text{ cm}^3$  respectivamente.

#### Moldes prismáticos superficiales para ensayo en dos direcciones.

Para el curado, y posterior ensayo a flexión de estas placas, se realizó una adaptación de la Norma UNE-EN 12467:2006 [8], la cual las clasifica de pequeño tamaño por tener una superficie menor a  $0,4 \text{ m}^2$  y una relación longitud/anchura menor a 3.

Suponiendo que estas placas tengan como destino elementos exteriores expuestos a calor y heladas, se plantea el procedimiento de curado bajo las condiciones de las placas tipo A, según la clasificación de la citada norma. Este tipo de placa corresponde a aquellas que están destinadas a aplicaciones en las que pueden estar sometidas a calor, humedad elevada y fuertes heladas.

Para lubricar estos moldes se utilizó una capa fina de vaselina y el procedimiento de elaboración consistió en:

- ✓ asegurar el molde a la mesa vibratoria descrita en el punto 3.2.10.3, diseñada para la fabricación de tejas, utilizada por contar con un movimiento más suave que la mesa vibradora de hormigón;
- ✓ colocar el mortero con una cuchara en 5 puntos, 4 cuadrantes y uno central;
- ✓ comenzar el vibrado controlando que la distribución se realiza homogéneamente completando donde no se alcance la altura del molde;
- ✓ finalizar la vibración cuando dejan de producirse burbujas en la superficie, después de 60 s aproximadamente;
- ✓ retirar el molde de la mesa vibradora e inmediatamente quitar el exceso de mortero con una regla plana;
- ✓ limpiar el molde, cubrirlo con una placa de material impermeable y colocarlo en una superficie horizontal dentro de cámara húmeda, sin apilar los moldes;
- ✓ entre 20 h y 24 h después del enmoldado realizar el desmolde, marcando cada probeta con lápiz o cera resistente al agua

- ✓ posteriormente colocarlas dentro de una bolsa de polietileno y pulverizarlas con agua y cerrar herméticamente para mantener las caras húmedas
- ✓ colocar en cámara húmeda, en forma horizontal, y conservar 13 días
- ✓ retirar de la cámara y sumergir en agua 24 horas antes de ensayar

Para el almacenaje, tanto en la cámara húmeda como en el tanque de inmersión, se diseñó un sistema de baldas (estantes) realizado con cerámicas de 35 x 35 x 0,5 cm cuyos apoyos fueron tapas de envases post-consumo utilizados para fibras. Este sistema de conservación permitió garantizar que no se vieran sometidas a esfuerzos previos al ensayo a flexión.

### 3.3.7 Resistencias mecánicas

#### 3.3.7.1 Flexión

Este ensayo se ha realizado según procedimientos adecuados a cada uno de los tipos de probetas, por lo cual se detallarán siguiendo el mismo criterio que en el punto anterior.

##### Probetas prismáticas lineales

Para estas muestras se siguió el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [6] mencionada, que consiste en el método de carga a 3 puntos (Figura 3.59 y 3.60):

- ✓ se coloca el prisma en la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos soporte separados  $100,0 \pm 0,5$  mm y su eje longitudinal normal a los soportes;
- ✓ se aplica una carga central vertical mediante un rodillo en la cara lateral opuesta a la de apoyo y se incrementa uniformemente a una velocidad de  $50 \pm 10$  N/s hasta la rotura
- ✓ se mide las dimensiones de la sección de rotura con aproximación de  $\pm 0,1$  mm
- ✓ se mantienen las mitades del prisma cubiertas con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.

- ✓ se calcula la resistencia a flexión,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , en megapascales mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{1,5 F_{m\acute{a}x} \times L_S}{w^3} \quad \text{Ecuaci3n 3.8}$$

donde

$\sigma_{Fm\acute{a}x}$  es la resistencia maxima a flexi3n, en MPa;

$w$  es el ancho, lado de la secci3n cuadrada del prisma, en mm;

$F_{m\acute{a}x}$  es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura, en N;

$L_S$  es la distancia entre soportes, en mm.

Figura 3.59 - Resistencia a flexi3n probetas 25 x 25 x 140 mm<sup>3</sup>

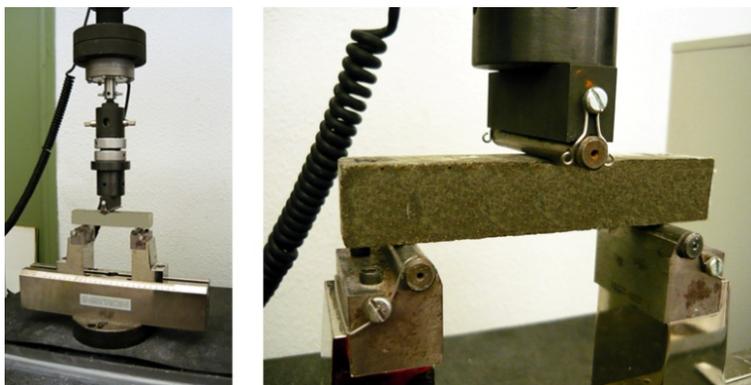
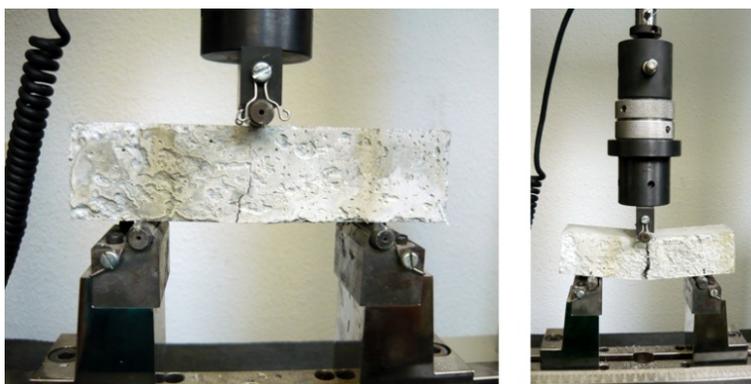


Figura 3.60 - Resistencia a flexi3n probetas 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>



### Probetas prismáticas superficiales para ensayo en una sola dirección.

Ante la ausencia de normativa para este material compuesto, para estas probetas, se ha adaptado el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 1170-4:1988 [7], que consiste en el método de carga a 4 puntos (Figura 3.61):

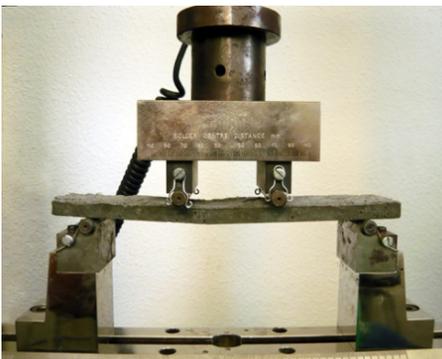
- ✓ se coloca la placa en la máquina de ensayo, con una cara mayor sobre los rodillos soporte separados 200 mm para las placas de 1 cm de espesor y 300 mm para las placas de 2 cm de espesor;
- ✓ se aplica dos cargas centrales verticales, ubicadas a tercios de la luz entre apoyos, mediante un rodillo en la cara lateral opuesta a la de apoyo y se incrementa uniformemente a una velocidad de  $10 \pm 1$  N/s hasta la rotura;
- ✓ medir, redondeando en  $\pm 0,1$  mm, la base y altura de la sección de rotura;
- ✓ se determina la resistencia a flexión máxima,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , en megapascales, como:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x} \times L_S}{w \times d^2} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

donde

- $\sigma_{Fm\acute{a}x}$  es la resistencia máxima a flexión, en MPa;
- $w$  es el ancho de la sección, en mm;
- $d$  es el espesor de la sección, en mm;
- $F_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima aplicada registrada, en N;
- $L_S$  es la distancia entre soportes, en mm.

Figura 3.61 - Ensayo a flexión muestras  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$



### Probetas prismáticas superficiales para ensayo en dos direcciones.

Para determinar la resistencia a flexión de estas muestras se ha adaptado el procedimiento establecido en la Norma UNE-EN 12467:2006 [8], que consiste en un ensayo a tres puntos en dos direcciones (Figura 3.62):

- ✓ se coloca la placa en la máquina de ensayo, con una cara inferior sobre los rodillos soporte separados 200 mm;
- ✓ se aplica una carga central vertical, ubicadas a mitad de la luz entre apoyos, mediante un rodillo en la cara lateral opuesta a la de apoyo y se incrementa uniformemente a una velocidad de  $10 \pm 1$  N/s hasta la rotura;
- ✓ medir, redondeando en  $\pm 0,1$  mm, el espesor en dos puntos de la sección de rotura en el sentido 1;
- ✓ recomponer la probeta y someterla a un segundo ensayo de flexión con la línea de carga perpendicular a la del primer ensayo;
- ✓ medir, redondeando en  $\pm 0,1$  mm, el espesor en dos puntos de la sección de rotura en el sentido 2;
- ✓ se determina la resistencia a flexión máxima en cada dirección,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , en megapascales, como:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{3 \times F_{m\acute{a}x} \times L_S}{2 \times w \times d^2} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

donde

$\sigma_{Fm\acute{a}x}$  es la resistencia máxima a flexión, en MPa;

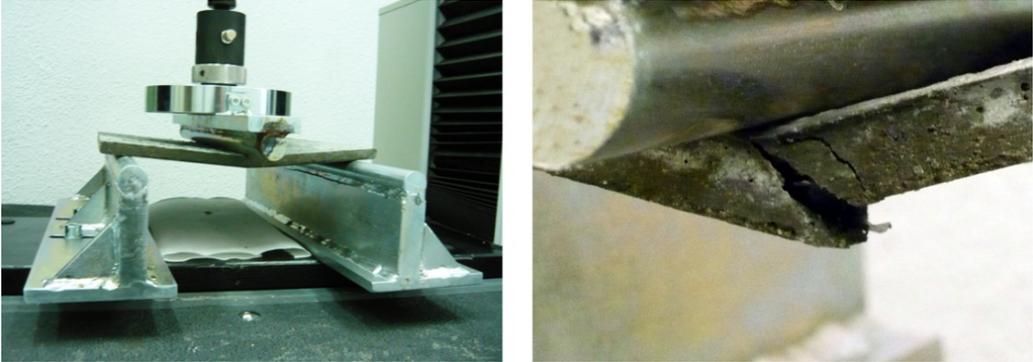
$w$  es el ancho de la sección, en mm;

$d$  es el espesor de la sección, en mm;

$F_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima aplicada registrada, en N;

$L_S$  es la distancia entre soportes, en mm.

La tensión máxima a flexión de las placas es la media aritmética de los diez valores obtenidos (cinco valores en cada dirección).

Figura 3.62 - Ensayo a flexi3n muestras 24 x 24 x 1 cm<sup>3</sup>

### 3.3.7.2 Compresi3n

Este ensayo se realiz3 que siguiendo el procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [6] para los semi-prismas obtenidos en el ensayo a flexi3n de probetas prismáticas lineales. El mismo consiste en:

- ✓ se coloca el semi-prisma en el templete de ensayos a compresi3n (Figura 3.63);
- ✓ se centra lateralmente con relaci3n a los platos de acero del templete a  $\pm 0,5$  mm;
- ✓ se le aplica una carga uniforme a una velocidad de  $2400 \pm 200$  N/s hasta la rotura;
- ✓ se calcula la resistencia máxima a compresi3n,  $\sigma_{C\text{máx}}$ , en megapascales, mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_{C\text{máx}} = \frac{F_{C\text{máx}}}{a \times b} \quad \text{Ecuaci3n 3. 11}$$

donde

$\sigma_{C\text{máx}}$  es la resistencia máxima a compresi3n, en MPa;

$a$  es el ancho de la secci3n en contacto con los platos, en mm;

$b$  es el largo de la secci3n en contacto con los platos, en mm;

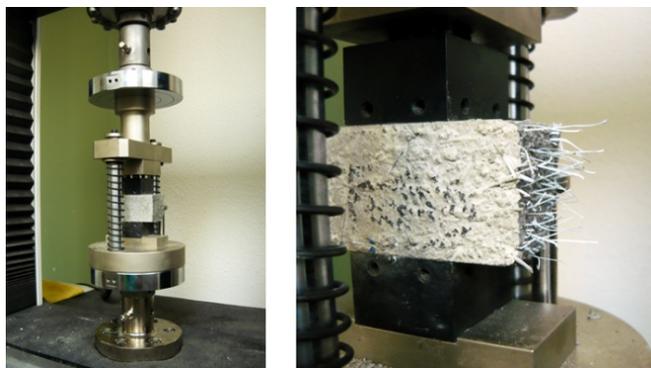
$F_{C\text{ máx}}$  es la carga máxima aplicada registrada, en N;

En los semi-prismas provenientes de probetas de 25 x 25 x 140 mm<sup>3</sup>, la sección de contacto con los platos es de 25 x 40 mm<sup>2</sup> (Figura 3.63). En las provenientes de probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> es de 40 x 40 mm<sup>2</sup> (Figura 3.64) coincidiendo con la dimensión de los platos.

Figura 3.63 - Ensayo a compresión en muestras con secciones de 25 x 40 mm<sup>2</sup>



Figura 3.64 - Ensayo a compresión en muestras con secciones de 40 x 40 mm<sup>2</sup>



### 3.3.7.3 Módulo elástico.

Partiendo de los valores registrados en los ensayos de flexión y compresión, se ha determinado el módulo elástico a cada una de estas sollicitaciones mediante el cálculo

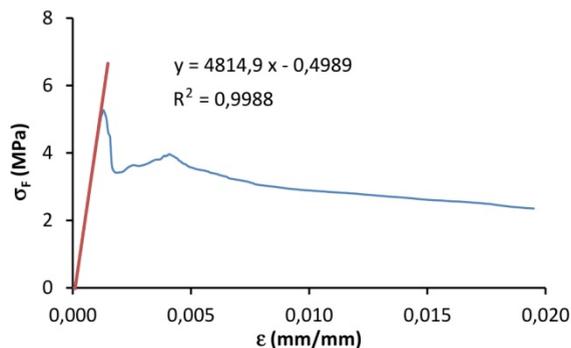
de la pendiente del tramo elástico en la curva tensión-deformación. Estos valores obtenidos no son exactos, se calcularon a los efectos de realizar una comparación de magnitudes entre muestras reforzadas con distintos tipos de fibra y con la muestra control (sin reforzar).

Esto se debe a que en la parte elástica de la curva carga tensión-deformación, el valor de la pendiente puede no representar necesariamente el módulo de elasticidad. Consigue ser bastante similar si se utilizan condiciones óptimas en el ensayo (extensómetros calibrados con alta resolución y a doble cara, etc.) que no es el caso. En este trabajo las extensiones se han obtenido por el movimiento del pistón a través del software de la prensa.

Al ser las muestras ensayadas elementos de poco canto, se entiende que las medidas de deformación así determinadas difieren, de las que se hubieran obtenido a través de extensómetros, en un orden de magnitud que no compromete los resultados comparativos.

En los resultados de ensayos de flexión, para determinar la pendiente, y por lo tanto el valor del módulo elástico a flexión, se realizó el ajuste por mínimos cuadrados. Se utilizó como herramienta una planilla electrónica que nos indica la línea de tendencia en el rango elegido, con la ecuación y el coeficiente de correlación correspondiente (Figura 3.65). Este último, parámetro para el estudio de una distribución bidimensional, nos indica el grado de dependencia entre las variables  $x$  e  $y$ . El rango se estableció según tipo de material a ensayar y definido por el tramo lineal de la gráfica.

Figura 3.65 - Ejemplo de aplicación del ajuste por mínimos cuadrados.  
Gráfica correspondiente a una muestra de placas reforzadas con fibras P-NC, ensayadas a flexión.



La ecuación de la línea de tendencia lineal es de primer grado con término independiente,  $y = A x + B$ , donde  $A$  es el valor de la pendiente en megapascales.

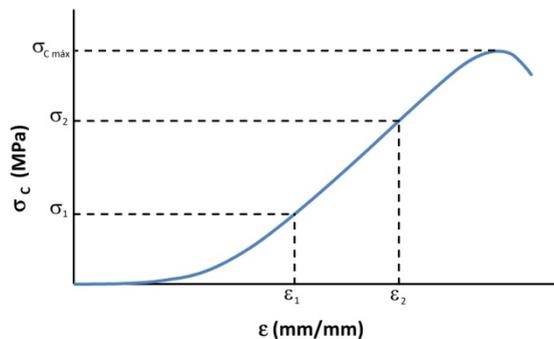
Observando la correlación de valores en los ensayos (Figura 3.66), para el cálculo del módulo elástico a compresión se utilizó la tensión y la deformación al 30% y al 70% de tensión máxima ( $\sigma_{c\ máx}$ ) según la ecuación:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} .0,001 \quad \text{Ecuación 3.12}$$

donde,

- $E$  es el módulo de elasticidad en GPa;
- $\sigma_1$  es la tensión al 30% de la tensión máxima en MPa;
- $\sigma_2$  es la tensión al 70% de la tensión máxima en MPa;
- $\varepsilon_1$  es la deformación correspondiente a  $\sigma_1$  en mm/mm;
- $\varepsilon_2$  es la deformación correspondiente a  $\sigma_2$  en mm/mm

Figura 3.66 - Gráfica esquemática tensión/deformación para compresión.

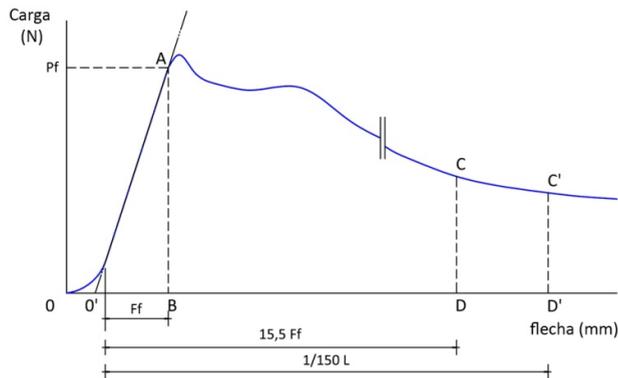


#### 3.3.7.4 Tenacidad

A partir de las curvas fuerza/deformación realizadas con los resultados de los ensayos de flexión se ha determinado el valor de tenacidad ( $T$ ) e índice 30 ( $I_{30}$ ), procedimiento indicado en la Norma UNE 83510:2004 [15] y los índices 5, 10 y 20 ( $I_5$ ,  $I_{10}$  y  $I_{20}$ ) indicados en la Norma ASTM C 1018-97 [16] para hormigones con fibras en ambos casos.

La tenacidad  $T$ , es la energía que es necesaria comunicar a la probeta en el ensayo de flexión para que ésta alcance una flecha igual a  $1/150$  de la distancia entre ejes de apoyos, y viene representada por el área  $O'AC'D'$  de la Figura 3.67.

Figura 3.67 - Diagrama carga-flecha esquemático con indicación de los límites para el cálculo de tenacidad ( $T$ ) e índice 30 ( $I_{30}$ )



El índice de tenacidad  $I_{30}$  se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva carga-flecha desde el origen hasta el segmento CD (correspondiente a 15,5 veces la flecha de primera fisura,  $O'ACD$ ) por el área del triángulo  $O'AB$ . El área de este último corresponde a la energía necesaria para producir la primera fisura.

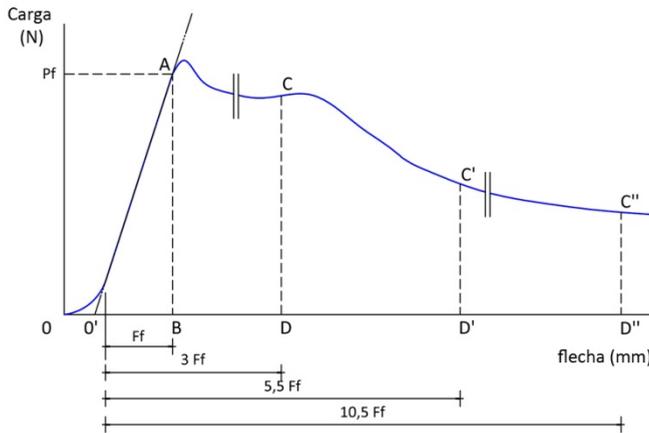
Complementando estos cálculos, en la Norma ASTM C 1018-97 [16] se indica el procedimiento para determinar los índices de tenacidad 5, 10 y 20 (Figura 3.68).

El índice de tenacidad  $I_5$  se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva carga-flecha desde el origen hasta el segmento CD (correspondiente a 3 veces la flecha de primera fisura,  $O'ACD$ ) por el área del triángulo  $O'AB$ .

Con igual criterio, el índice de tenacidad  $I_{10}$  se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva carga-flecha desde el origen hasta el segmento  $C'D'$  (correspondiente a 5,5 veces la flecha de primera fisura,  $O'ACD'$ ) por el área del triángulo  $O'AB$ .

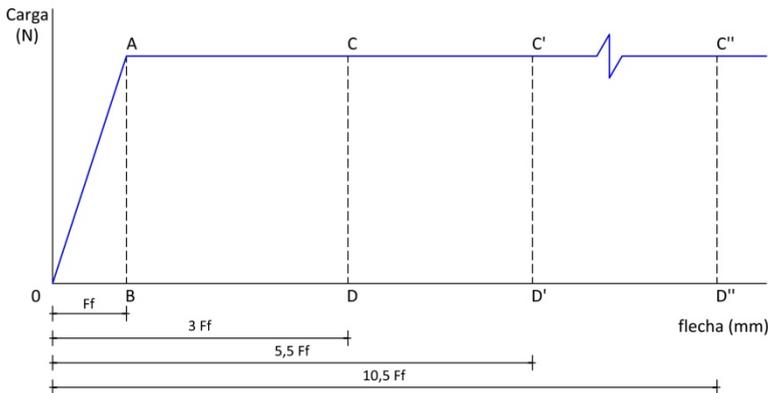
Finalmente, el índice de tenacidad  $I_{20}$  se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva carga-flecha desde el origen hasta el segmento C'D' (correspondiente a 10,5 veces la flecha de primera fisura, O'ACD) por el área del triángulo O'AB.

Figura 3.68 - Diagrama carga-flecha esquemático con indicación de los límites para el cálculo de los índices 5, 10 y 20 ( $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{20}$ )



En un material elasto-plástico ideal los índices de tenacidad alcanzarían los valores indicados en el mismo índice: 5, 10, 20 y 30 (Figura 3.69). En hormigón en masa estos índices valen 1, dada su rotura frágil y en hormigones fibra-reforzados se observan valores de 1 a 6 para el  $I_5$ , 1 a 12 para el  $I_{10}$  y 1 a 25 para el  $I_{20}$  [16].

Figura 3.69 - Diagrama carga-flecha esquemático de un material elasto-plástico ideal.



### 3.3.7.5 Impacto

Para este ensayo se utiliza el equipo descrito en el punto 3.2.13.4 que básicamente consta de un tubo guía y una bola de acero de peso conocido.

Se ha realizado en las placas de  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  y el procedimiento para el mismo es una adaptación del Ensayo L 4.7.20 propuesto en el manual de ECOSUR para tejas de micro concreto (TMC) [10] y consiste en:

- ✓ la placa a ensayar se apoya sobre una estructura de listones de madera separados 20 cm, procurando que la estructura y la placa queden totalmente horizontales (Figura 3.70). También puede apoyarse en la base del equipo de flexión que reúne las mismas condiciones;
- ✓ se coloca el tubo sobre el centro de la sección de la placa y a mitad de la distancia entre listones, verificando su verticalidad;
- ✓ se coloca la clavija en la posición que indica los 400 mm de altura y sobre ella, dentro del tubo, la bola metálica;
- ✓ se retira la clavija dejando caer la bola metálica sobre la superficie de la placa;
- ✓ se repite este procedimiento de caída haciendo impacto en el mismo punto registrando el número de impactos necesarios para producir la primera fisura y la rotura de la placa (Figura 3.70).

Los parámetros técnicos de este ensayo plantean que, para una caída a 40 cm de altura en un espesor de 10 mm, la carga de impacto es igual a 8800 g x cm.

Figura 3.70 - Ensayo a impacto. Colocación de placa y tipos de rotura.

A - Posicionado de placa; B - Rotura con fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ ; C - Rotura con fibras de  $4 \times 50 \text{ mm}^2$





### 3.4 Referencias Bibliográficas

- [1] Orgánica, Dpto Química. PET. Disponible: <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/pet/historia.htm>
- [2] Payá, J, Monzó, J y Borrachero, M.V, "Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures," Cement and Concrete Research, vol. 29, pp. 1773-1779, 1999.
- [3] Monzó, J., Payá, J., Borrachero, M.V. y Córcoles, A., "Use of sewage sludge ash(SSA)-cement admixtures in mortars," Cement and Concrete Research, vol. 26, pp. 1389-1398, 1996.
- [4] AENOR, "UNE-EN ISO 1183-1:2004 Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Métodos de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración (ISO 1183-1:2004)," ed, 2004.
- [5] AENOR, "UNE 80113:1986. Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la expansión en autoclave. ," ed, 1986.
- [6] AENOR, "UNE-EN 196-1:2005 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas," ed, 2005.
- [7] AENOR, "UNE-EN 1170-4:1998 Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para hormigón armado con fibra de vidrio. Parte 4: Medida de la resistencia a flexión, método "ensayo simplificado a flexión", " ed, 1998.

- [8] AENOR, "UNE-EN 12467:2006 Placas planas de fibrocemento. Especificaciones del producto y métodos de ensayo," ed, 2006.
- [9] Singh, S., Shukla, A. y Brown, R., "Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, pp. 1919-1925, 2004.
- [10] Meléndez, M., Espinosa, O., Rhyner, K. y Noboa, M., "Un techo que cubre al mundo: la Teja de MicroConcreto TMC," ECOSUR ed, 2004.
- [11] AENOR, "UNE-EN ISO 1183-1:2004 Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Método de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración(ISO 1183-1:2004).", ed, 2004.
- [12] AENOR, "UNE-EN 14889-2:2008 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Deficiones, especificaciones y conformidad.," ed, 2008.
- [13] AENOR, "UNE-EN ISO 6892-1:2010 Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente (ISO 6892-1:2009)," ed, 2010.
- [14] AENOR, "UNE-EN 14649:2006 Productos prefabricados de hormigón. Método de ensayo para la determinación de la resistencia remanente de las fibras de vidrio en el cemento y el hormigón (ensayo SIC)," ed, 2006.
- [15] AENOR, "UNE 83510:2004 Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a primera fisura," ed, 2004.
- [16] ASTM, "ASTM C 1018-97 Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading).", ed, 1997.