

**TESIS DOCTORAL**

**REFUERZO DE MATRICES CEMENTICIAS MEDIANTE LA  
VALORIZACIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS PROVENIENTES DE  
RESIDUOS POST-CONSUMO**

**MARIA ESTHER FERNANDEZ IGLESIAS**

**Directores:**

**Dr. José María Monzó Balbuena**

**Dr. Jorge Juan Payá Bernabeu**

**Departamento Ingeniería  
de la Construcción y  
Proyectos de Ingeniería Civil**

**Valencia, España 2013**





# **Refuerzo de Matrices Cementicias mediante la Valorización de Fibras Sintéticas provenientes de Residuos Post-Consumo**

**Tesis Doctoral**

Autora:

**MARIA ESTHER FERNANDEZ IGLESIAS**

Directores:

**Dr. José María Monzó Balbuena**

**Dr. Jorge Juan Payá Bernabeu**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y  
PROYECTOS DE INGENIERIA CIVIL**

**Valencia (España), 2013**



---

*“Son cosas chiquitas. No acaban con la pobreza, no nos sacan del subdesarrollo, no socializan los medios de producción y de cambio, no expropian las cuevas de Alí Babá. Pero quizá desencadenen la alegría de hacer, y la traduzcan en actos. Y al fin y al cabo, actuar sobre la realidad y cambiarla, aunque sea un poquito, es la única manera de probar que la realidad es transformable”.*

**Eduardo Galeano**

---



# AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las instituciones y personas que directa o indirectamente han colaborado en la realización de este trabajo.

A la Comisión Europea, a través del programa de movilidad **“Erasmus Mundus External Cooperation Windows” Mundus 17**, que financió la estancia de estos años de investigación, así como a las autoridades de la **Facultad de Arquitectura de la Universidad de la República (UdelaR)** de la República Oriental del Uruguay, que han concedido los permisos requeridos para realizar los mismos.

A los integrantes del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) por acogerme entre los suyos como uno más, especialmente a mis tutores José María Monzó Balbuena y Jorge Juan Payá Bernabeu. A María Victoria Borrachero y Mercedes Bonilla Salvador por su dedicación y ayuda incondicional en distintas etapas de la elaboración de este trabajo, así como a Ana Mellado por su ánimo constante.

A Pedro Serna por su tiempo y conocimiento, pero sobre todo por pensar en voz alta ante mis consultas de un minuto que siempre duraron un poco más.

A todos y cada uno de los compañer@s de viaje en las distintas etapas de este trayecto: Mauro, Jesús, Erich, David, Gonzalo, Rosana, Fei, Lucía, Pablo, Noelia, Clara, Yasna, Marian, Vicente, Andrea, Vinicius y muy especialmente a Lourdes Soriano que, junto a sus aportes conceptuales, oficia de nexo entre las distintas generaciones y nacionalidades que componemos este equipo, principalmente a través de los intercambios generados en la hora del almuerzo.

A los profesores visitantes Jorge, Antonio y Gladis por los intercambios de experiencias que mantuvimos durante sus estancias.

A los técnicos del Laboratorio: Pascual, Juan M., Juan F., Paco, Lino, Javier y Amparo por brindarme su ayuda cuando me ha sido necesaria.

A los integrantes del Servicio de Microscopia de la Universidad en particular a Merche y Manolo.

A quienes han colaborado en la recolección de los residuos utilizados, particularmente a Araceli y Ana que, sin conocerme, han realizado el mayor aporte de envases post-consumo.

A Dami y Lola por las horas compartidas, por enseñarme sus mundos a la distancia, por permitirme ser parte de sus vidas.

A Laura, Paola y Duilio por estar a mi lado en todo momento, principalmente en aquellos donde tuvieron que actuar con prisas para realizar trámites en mi nombre.

A Marta e Isabel por sus fresias, traducciones y paseos. Por ser amigas.

A los compañeros de instituto y cátedras de mi centro de estudios que han visto incrementadas sus responsabilidades en este período de ausencia, así como a los que han suplido mis funciones.

A mis padres, por haberme enseñado a pensar, por permitirme aprender de su experiencia y por apoyar incondicionalmente todas las decisiones que he tomado hasta el momento. A mi hermana y sobrinos por hacerme el aguante desde la otra orilla del charco.

Por último, a Son, quien me alienta constantemente en la idea de seguir formándome, hace lo imposible para que no me sienta tan lejos del paisito y sin quien no podría haber emprendido esta nueva andadura de mi vida, así como las futuras.

En el campo de la Ingeniería Civil, existe una búsqueda permanente de mejorar las características de materiales de matrices cementicias así como la aplicación de distintos tipos de fibras para su refuerzo, particularmente desde que se prohibió el empleo de amianto.

La aplicación de fibras sintéticas es parte de estas continuas investigaciones existiendo algunas cuyo resultado ha sido aprobado y su uso comercial se encuentra establecido como es el caso del polipropileno, por ejemplo.

Paralelamente, el destino final de residuos sigue siendo un tema preocupante tanto por el incremento en su generación como por los recursos físicos y económicos que se requieren para tal fin.

En el presente trabajo se realiza el estudio de la valorización de fibras sintéticas obtenidas de residuos post-consumo cuando son empleadas como refuerzo de matrices cementicias.

Se emplean fibras elaboradas a partir de envases post-consumo de polietileno tereftalato (PET) y polietileno de alta densidad (HDPE), hebras mono y multi-filamentos producidas en la elaboración de escobas, así como las obtenidas de los residuos generados en la instalación y sustitución del cableado de Sistemas de Telecomunicaciones (fibra óptica).

Se realiza la caracterización física y mecánica de estos materiales residuales, así como el estudio de su durabilidad al estar inmersos en medios alcalinos y, particularmente, en matrices cementicias.

Para la elaboración de muestras de mortero reforzado con fibras provenientes de estos residuos se emplearon probetas prismáticas a las cuales se les realizaron los ensayos de flexión y compresión. Estos ensayos permitieron relacionar los valores obtenidos de los morteros fibrorreforzados (FRM) con los de un mortero de iguales características sin refuerzo de fibras.

Estos ensayos permitieron obtener las curvas esfuerzo/deformación y tensión/deformación específica que sirvieron para determinar los módulos elásticos, tenacidad e índices de tenacidad para cada una de las muestras elaboradas.

Finalmente se profundizó el estudio en la valorización de residuos plásticos de envases post-consumo, particularmente polietileno tereftalato (PET), empleándolos como refuerzo de morteros de matriz cementicia.

Luego de continuarse con la caracterización del PET empleado, profundizado en su durabilidad y aplicados procedimientos sencillos de producción, se han elaborado fibras de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$ , con corte de cizalla, y  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ ,  $4 \times 35 \text{ mm}^2$  y  $4 \times 50 \text{ mm}^2$  cortadas mediante destructoras de documentos.

Con estas fibras se han elaborado muestras laminares que se sometieron a ensayo de flexión de 3 y 4 puntos. Estos ensayos permitieron obtener las curvas esfuerzo/deformación y tensión/deformación específica para determinar su capacidad resistente así como los módulos elásticos a flexión, tenacidad e impacto en cada una de las muestras.

Los resultados obtenidos muestran que estas fibras pueden ser una opción de refuerzo, sobre todo orientadas a la producción de FRM en países en vías de desarrollo, debiéndose adecuar tanto su forma de producción como las dimensiones de las probetas al elemento constructivo que se pretenda desarrollar.

En el camp de l'Enginyeria Civil, hi ha una recerca permanent per a millorar les característiques dels materials amb matrius cimentants així com en l'aplicació de diferents tipus de fibres per al seu reforç, particularment des que es va prohibir l'ús d'amiant.

L'aplicació de les fibres sintètiques és part d'aquestes contínues investigacions, els resultats aprovats i així l'ús comercial es troba establert com el cas del polipropilè, per exemple.

Paral·lelament, la destinació final dels residus segueix sent un tema preocupant tant per l'increment que es genera com pels recursos físics i econòmics que es requereixen per a tal fi.

En el present treball es realitza l'estudi de la valorització de fibres sintètiques obtingudes de residus postconsum quan són emprades com a reforç de matrius cimentants.

S'empren fibres elaborades a partir d'envasos postconsum de polietilè tereftalat (PET) i de polietilè d'alta densitat (HDPE), els brins mono i multi-filament produïts en l'elaboració de graneres, així com les fibres obtingudes dels residus generats en la instal·lació i substitució del cablejat dels sistemes de telecomunicació (fibra òptica).

Es realitza la caracterització física i mecànica d'aquests materials residuals, així com l'estudi de la durabilitat quan estan immersos en medis alcalins i, particularment, en matrius cimentants.

Per a l'elaboració de mostres de morter reforçat amb fibres que provenen d'aquests residus es van emprar provetes prismàtiques a les quals se'ls van realitzar els assajos de

flexió i de compressió. Aquests assajos van permetre relacionar els valors obtinguts dels morters fibroreforçats (FRM) amb els d'un morter de les mateixes característiques però sense reforç de fibres.

Aquests assajos van permetre obtenir les corbes esforç/deformació i tensió/deformació específica que van servir per a determinar els mòduls elàstics, la tenacitat i els índexs de tenacitat per a cadascuna de les mostres elaborades.

Finalment es va aprofundir en l'estudi de la valorització dels residus plàstics d'envasos postconsum, particularment polietilè tereftalat (PET) , emprant-los com a reforç de morters de matriu cimentant.

Després de la caracterització del PET emprat, es va aprofundir en la durabilitat i en procediments senzills de producció. S'han elaborat fibres d'1x18mm<sup>2</sup>, amb tall de cisalla, i de 4x18 mm<sup>2</sup>, de 4 x 35 mm<sup>2</sup> i de 4 x 50 mm<sup>2</sup> tallades mitjançant destructores de documents. Amb aquestes fibres s'han elaborat mostres laminars que es van sotmetre a assajos de flexió de 3 i de 4 punts.

Aquests assajos van permetre obtenir les corbes esforç/deformació i tensió/deformació específica per a determinar la capacitat resistent així com els mòduls elàstics a flexió, la tenacitat i la resistència a l'impacte en cadascuna de les mostres.

Els resultats obtinguts mostren que aquestes fibres poden ser una opció de reforç, sobretot orientades a la producció de FRM en països en vies de desenvolupament, havent-se d'adequar tant la forma de producció com les dimensions de les provetes segons l'element constructiu que es pretenga fabricar.

# ABSTRACT

In the field of Civil Engineering, there is a constant research for improving the characteristics of cementitious based materials and the application of different types of fibers for reinforcement, particularly since the use of asbestos is not permitted.

The application of synthetic fibers is a part of these continuous researches, and there are some of them whose results have been approved and their commercial uses have been established, for example in the case of polypropylene.

At the same time, the final destination of waste is still a worrying issue because the increase of their generation and the big amount of physical and economic resources required for this purpose.

In the present work, we study the valorization of synthetic fibers derived from post-consumer waste when they are used as reinforcement of cement matrices.

Used fibers are made from post-consumer polyethylene terephthalate (PET) and high density polyethylene (HDPE) packages, mono and multi-strand filaments used in brooms production and those obtained from the waste generated at the facility and the replacement of wires in telecommunications systems (optical fiber).

The physical and mechanical characterization of these waste materials were carried out, and also the study of their durability when immersed in alkaline environment, and particularly in cement matrices.

To prepare samples of mortar reinforced with fibers from these residues, prismatic specimens were cast and tested by bending and compression procedures. These tests

allowed to determine the relationship between values obtained for fiber reinforced mortar (FRM) and mortar of the same features without fiber reinforcement.

These studies allowed to obtaining load/strain curves and stress/strain curves which were used to determine specific elastic modulus, toughness and toughness indices for selected samples.

Finally, the study in deep on the recovery of plastic waste from post-consumer packages was developed, particularly polyethylene terephthalate fibers (PET), which were used as reinforcement in mortars cement matrix.

The characterization of PET fibers was completed, specially on their durability behaviour and the development of simple production procedures; the following sizes of fibers were prepared:  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  fibers from shear cutting, and  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ ,  $4 \times 35 \text{ mm}^2$  and  $4 \times 50 \text{ mm}^2$  from documents shredder cutting.

Cement based laminar samples were prepared using these fibers, that were tested by 3 and 4 points bending procedures. These studies permit to obtain load/strain and stress/strain specific curves which were used for determining mechanical strength and flexural elastic modulus, toughness and impact resistance for selected samples.

The results show that these fibers can be a good choice for reinforcing, especially interesting to FRM production in developing countries. It would be necessary to adapt its production procedure depending on the selected construction elements.

# INDICES



## CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1	Uso de fibras en el campo de la Ingeniería Civil.....	1
1.2	Residuos .....	5
1.2.1	Generación y Gestión.....	5
1.2.1.1	Generación de Residuos en la Unión Europea (UE) .....	6
1.2.1.2	América Latina y el Caribe (ALC).....	8
1.2.2	Tratamiento y Disposición final.....	10
1.2.3	Composición y Características de los Residuos .....	15
1.2.4	Residuos Reciclables .....	19
1.2.5	Residuos Plásticos (sintéticos).....	23
1.2.6	Reciclaje de Residuos Plásticos.....	26
1.3	Matrices cementicias fibroreforzadas .....	35
1.3.1	Matriz Cementicia.....	36
	Adiciones .....	38
	Puzolanas.....	40
	Ceniza Volante (FA “fly ash”).....	41

Residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico (FCC “fluid catalytic cracking”) .....	41
Ceniza de Cáscara de Arroz (RHA “rice husk ash” ) .....	42
Ceniza de Lodos de Depuradora (SSA “sewage sludge ash”) .....	42
Residuo Cerámico (CW “ceramic waste” ) .....	43
1.3.2 Fibras .....	43
1.3.2.1 Fibras de asbesto .....	47
1.3.2.2 Fibras metálicas.....	48
1.3.2.3 Fibras de vidrio .....	49
1.3.2.4 Fibras Poliméricas .....	50
Fibras de bajo módulo .....	51
Fibras de Polipropileno (PP) .....	51
Fibras Acrílicas .....	52
Fibras de Nylon .....	52
Fibras de Polietileno .....	53
Fibras de poliolefina.....	53
Fibras de Alto Módulo.....	54
1.3.2.5 Fibras Naturales .....	54
1.3.3 Interfaz.....	55
1.4 Residuos sintéticos en matrices cementicias.....	59
1.4.1 Uso de partículas de residuos sintéticos post-consumo como agregados en matrices cementicias. ....	60
Grupo de investigación de T.R. Naik, país: EEUU.....	60
Grupo de investigación de R. Gaggino, país: República Argentina.....	61

Grupo de investigación de Y-M. Choi, país: Corea del Sur.....	62
Grupo de investigación de O.Y. Marzouk, país: Francia.....	63
Otras investigaciones .....	63
1.4.2 Uso de fibras obtenidas de residuos sintéticos post-consumo como fibrorefuerzo de matrices cementicias.....	65
1.4.2.1. Grupos de investigación que analizan características mecánicas de matrices cementicias reforzadas con fibras provenientes de envases pos-consumo de PET .....	67
Grupo de investigación de T. Ochi, país: Japón.....	67
Grupo de investigación de D. Foti, país: Italia.....	68
Otras Investigaciones .....	69
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. ....	69
Grupo de investigación de D. A. Silva, país: Brasil .....	69
Grupo de investigación de T. Ochi, país: Japón.....	70
Grupo de investigación de V. Machovic, país: República Checa.....	71
Grupo de investigación de J-P. Won, país: Korea.....	72
1.4.2.3. Grupos de investigación que analizan características mecánicas en matrices cementicias reforzadas con fibras provenientes de otros residuos de material sintético.....	73
Grupo de investigación de Y. Wang, país: EEUU .....	73
Grupo de investigación de P. Soroushian, país: EEUU.....	75
1.4.2.4. Relación cronológica de trabajos publicados. ....	76

1.5 Referencias Bibliográficas .....	77
--------------------------------------	----

## CAPITULO 2 – OBJETIVOS

2.1 Objetivo General .....	91
2.2 Objetivos Específicos .....	93

## CAPITULO 3 – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales.....	95
3.1.1 Cemento .....	95
3.1.2 Áridos.....	96
3.1.3 Agua.....	96
3.1.4 Adiciones .....	96
3.1.4.1 Ceniza Volante (FA) .....	97
3.1.4.2 Residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico (FCC).....	97
3.1.4.3 Ceniza de Cáscara de Arroz (RHA) .....	97
3.1.4.4 Ceniza de Lodo de Depuradora (SSA).....	98
3.1.4.5 Residuo Cerámico (CW).....	98
3.1.4.6 Metacaolín (MK) .....	99
3.1.4.7 Humo de sílice (SF) .....	99
3.1.5 Otros .....	99
3.1.5.1 Hidróxido de Sodio .....	99
3.1.5.2 Hidróxido Cálcico.....	99
3.1.5.3 Ácido Clorhídrico .....	99
3.1.5.4 Etanol .....	100
3.1.6 Fibras.....	100

3.1.6.1	Residuos .....	100
	Envases plásticos post-consumo.....	100
	PET .....	100
	HDPE .....	102
	Servicios de telecomunicaciones.....	103
	Industria textil .....	104
3.1.6.2	Tamaños empleados .....	104
	Fibras obtenidas de hojas delgadas (envases post- consumo).....	104
	Fibras obtenidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica).....	106
	Fibras obtenidas de cilindros huecos o tubos de sección circular.....	108
3.2	Equipos .....	109
3.2.1	Molienda. ....	109
3.2.2	Medición de pH .....	110
3.2.3	Densidad Aparente.....	111
3.2.4	Caracterización dimensional de fibras.....	111
3.2.5	Granulometría por difracción láser .....	112
3.2.6	Análisis termogravimétrico (TG) .....	113
3.2.7	Microscopia Óptica (Lupa binocular) .....	114
3.2.8	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) .....	115
3.2.9	Moldes .....	115
3.2.9.1	Flexión / Compresión prismas lineales.....	116
3.2.9.2	Flexión prismas superficiales (placas) .....	117

3.2.9.3 Pull-Out .....	118
3.2.10 Preparación de morteros.....	119
3.2.10.1 Amasadora.....	119
3.2.10.2 Compactadora.....	120
3.2.10.3 Mesa vibradora.....	121
3.2.10.4 Cámara Húmeda .....	122
3.2.11 Corte Mecánico de Fibras .....	122
3.2.11.1 Sistemas Manuales .....	122
3.2.11.2 Sistemas Mecánicos.....	123
3.2.12 Corte de muestras.....	124
3.2.13 Ensayos Mecánicos .....	125
3.2.13.1 Prensa.....	125
3.2.13.2 Microtest.....	126
3.2.13.3 Dinamómetro.....	127
3.2.13.4 Caída de peso.....	128
3.3 Procedimientos.....	129
3.3.1 Producción de fibras.....	129
3.3.1.1 Sistema de corte manual.....	129
Fibras obtenidas de hojas delgadas (envases post-consumo) .....	129
Fibras obtenidas de elementos lineales (multifilamentos y fibra óptica).....	130
Fibras obtenidas de cilindros huecos o tubos de sección circular.....	130
3.3.1.2 Sistema de corte mecanizado .....	130

3.3.2 Caracterización de fibras.....	132
3.3.2.1 Densidad aparente .....	132
3.3.2.2 Relaciones dimensionales.....	133
3.3.2.3 Resistencia a Tracción .....	134
3.3.2.4 Módulo Elástico .....	136
3.3.3 Durabilidad.....	137
3.3.3.1 En soluciones alcalinas .....	137
Hidróxido de Sodio .....	137
Hidróxido Cálcico .....	138
Cemento Pórtland .....	139
3.3.3.2 En pastas .....	139
Hidróxido Cálcico .....	139
Cemento Pórtland .....	140
Mixtas.....	141
3.3.3.3 Envejecimiento controlado.....	142
3.3.3.4 Evolución de la resistencia a tracción.....	142
3.3.3.5 Estudio termogravimétrico de pastas.....	144
3.3.4 Análisis de interfaz.....	145
Muestras para SEM .....	145
Moldes prismáticos especiales.....	146
Pull-out muestras simples .....	147
Pull-out muestras dobles.....	149
3.3.5 Amasado de morteros.....	152
3.3.6 Llenado de moldes.....	153
Moldes prismáticos lineales .....	154

Moldes prismáticos superficiales para ensayo en una sola dirección.....	155
Moldes prismáticos superficiales para ensayo en dos direcciones.....	156
3.3.7 Resistencias mecánicas.....	157
3.3.7.1 Flexión.....	157
Probetas prismáticas lineales .....	157
Probetas prismáticas superficiales para ensayo en una sola dirección.....	159
Probetas prismáticas superficiales para ensayo en dos direcciones. ....	160
3.3.7.2 Compresión .....	161
3.3.7.3 Módulo elástico.....	162
3.3.7.4 Tenacidad.....	164
3.3.7.5 Impacto.....	167
3.4 Referencias Bibliográficas .....	169

## CAPITULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estudios preliminares .....	173
4.1.1 Caracterización física de las fibras .....	173
4.1.1.1 Densidad aparente .....	174
4.1.1.2 Relaciones dimensionales. ....	176
4.1.1.3 Caracterización superficial mediante microscopia.....	179
4.1.2 Caracterización mecánica de las fibras .....	183
4.1.3 Caracterización mecánica del material compuesto.....	191
4.1.3.1 Flexión.....	192

4.1.3.2	Compresión .....	196
4.1.3.3	Módulos elásticos .....	197
4.1.3.4	Tenacidad.....	199
4.1.4	Degradación de fibras .....	201
4.1.4.1	Inmersión en medio alcalino .....	202
4.1.4.2	Inmersión en pasta cementicia con envejecimiento controlado.....	205
4.1.4.3	Inmersión en pasta cementicia con control de tiempo.....	213
4.1.4.4	Inmersión en pasta cementicia con adición de puzolanas...	222
4.1.5	Evaluación de los estudios preliminares.....	231
4.2	Refuerzo de matrices cementicias con fibras provenientes de envases post-consumo de PET .....	235
4.2.1	Caracterización mecánica de fibras.....	235
4.2.2	Durabilidad.....	237
4.2.2.1	Estudio, mediante microscopía electrónica de barrido, de fibras expuestas a distintos medios. ....	238
	Hidróxido Cálcico.....	238
	Matrices Mixtas.....	241
	Procedimiento de curado .....	247
4.2.2.2	Análisis de la evolución de la resistencia a tracción de fibras P-NC inmersas en matriz cementicia .....	249
4.2.2.3	Estudio, por Análisis Termogravimétrico (TG), de matrices cementicias.....	254
	Pasta cementicia según curado .....	257
	Pasta cementicia en contacto con P-NC.....	259
	Pastas mixtas .....	266

4.2.3 Interfaz.....	267
4.2.3.1 Estudio mediante Microanálisis por EDS. ....	267
4.2.3.2 Comportamiento mecánico.....	272
4.2.3.3 Ensayo de pull-out simple.....	273
4.2.3.4 Ensayo de pull-out doble .....	278
4.2.4 Características Mecánicas de probetas prismáticas .....	279
4.2.4.1 Resistencia a flexión.....	280
4.2.4.2 Resistencia a compresión.....	281
4.2.4.3 Módulos elásticos .....	283
4.2.4.4 Tenacidad.....	285
4.2.5 Características mecánicas de probetas laminares con matriz de cemento Pórtland. ....	287
4.2.5.1 Resistencia a flexión.....	288
4.2.5.2 Módulo elástico.....	295
4.2.5.3 Tenacidad.....	299
4.2.5.4 Impacto.....	306
4.2.6 Características mecánicas de probetas laminares de matriz mixta...	309
4.3 Referencias Bibliográficas .....	313

## CAPITULO 5 – CONCLUSIONES

Conclusiones.....	319
Futuras líneas de investigación .....	322

GLOSARIO .....	325
----------------	-----

# INDICE DE FIGURAS

## CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN

Figura 1.1	Residuos Urbanos Recogidos (RUR) en Unión Europea (27 países) y España.....	7
Figura 1.2	Residuos Urbanos Recogidos (RUR) en países de la Unión Europea (2010).....	8
Figura 1.3	Residuos Sólidos Urbanos (RSU) recolectados por año en México.....	9
Figura 1.4	Generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en América Latina y el Caribe 2010.....	9
Figura 1.5	Generación de Residuos Sólidos Urbanos en EEUU, Europa y ALC 2010.....	10
Figura 1.6	Disposición Final y Tratamientos empleados en Países Desarrollados, 2006.....	11
Figura 1.7	Tratamiento de Residuos Municipales Generados en la Unión Europea (27 países).....	12
Figura 1.8	Residuos Municipales Generados según tratamiento en España.....	12
Figura 1.9	Años necesarios para la degradación en función del tipo de residuo.....	13
Figura 1.10	Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en países de.....	14
Figura 1.11	Disposición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en México.....	15

Figura 1.12	Composición de Residuos por actividad en la Unión Europea (27 países).....	16
Figura 1.13	Generación de residuos por categoría en España (2008).....	16
Figura 1.14	Generación de residuos por categoría en la Unión Europea 27 países, (2008).....	17
Figura 1.15	Generación de residuos por categoría en Hogares de España, 2008.....	17
Figura 1.16	Generación de residuos por categoría en Hogares de la Unión Europea, 2008.....	18
Figura 1.17	Generación de Residuos Sólidos Urbanos por tipo de residuo en México (2011).....	18
Figura 1.18	Composición de los residuos sólidos urbanos (RSU) en la R.O. del Uruguay (2005).....	19
Figura 1.19	Distribución de los residuos reciclables en la Unión Europea (27 países), 2008.....	21
Figura 1.20	Distribución de los residuos reciclables en España, 2008.....	21
Figura 1.21	Distribución de los residuos reciclables en México, 2005 y 2008 a 2011.....	22
Figura 1.22	Distribución de los residuos reciclables en la Rep. Oriental del Uruguay, 2005.....	23
Figura 1.23	Residuos abandonados en la costa mediterránea.....	23
Figura 1.24	Consumo de plásticos por actividad en España. 2009.....	25
Figura 1.25	Residuos plásticos por actividad en España. 2009.....	25
Figura 1.26	Contenedores para recolección de Papel y Plástico españoles.....	26

Figura 1.27	Hurgador de materiales plásticos Montevideoano - República Oriental del Uruguay .....	27
Figura 1.28	Tasas de reciclado de plástico por origen en España. 2009 .....	29
Figura 1.29	Evolución del reciclado de envases plásticos en España. ....	30
Figura 1.30	Evolución de las tasas de reciclaje de envases plásticos en España. ....	31
Figura 1.31	Distribución continua de fibras: en barras (izquierda), en malla (derecha) .....	45
Figura 1.32	Distribución discontinua de fibras: alineadas (izquierda), dispersas (derecha) .....	45
Figura 1.33	Curvas tensión/deformación de una matriz, con un fibrorefuerzo convencional y con un fibrorefuerzo de alto rendimiento. ....	47
Figura 1.34	Fibras metálicas para hormigón: (a) sueltas, (b) en peine .....	49

### CAPITULO 3 – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Figura 3.1	Distribución granulométrica del cemento (CEMI-52,5R) .....	96
Figura 3.2	Distribución granulométrica de las adiciones empleadas.....	98
Figura 3.3	Envases de PET con indicación de zona empleada para fibras: .....	101
Figura 3.4	Fibras multifilamento producidas por SP-Berner para escobas. ....	102
Figura 3.5	Envases de HDPE-L con indicación de zona empleada para fibras.....	102
Figura 3.6	Cable de fibra óptica. Partes constitutivas.....	103
Figura 3.7	Fibras acrílicas proporcionadas por Piel SA.....	104
Figura 3.8	Fibras obtenidas de envases post-consumo: PET y HDPE.....	106
Figura 3.9	Muestras en forma de halterio.....	106

Figura 3.10	Fibras obtenidas de elementos lineales.....	107
Figura 3.11	Fibras obtenidas de cilindros huecos.....	108
Figura 3.12	Molino de bolas.....	109
Figura 3.13	Equipamiento para medida de pH.....	110
Figura 3.14	Picnómetro de Hubbard.....	111
Figura 3.15	Instrumentos de medición.....	111
Figura 3.16	Equipo de granulometría por difracción láser.....	113
Figura 3.17	Equipo de termogravimetría.....	114
Figura 3.18	Microscopio Óptico.....	114
Figura 3.19	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	115
Figura 3.20	Moldes metálicos para muestras prismáticas.....	116
Figura 3.21	Moldes de metacrilato para elaboración de placas.....	117
Figura 3.22	Moldes metálicos sobre base de metacrilato.....	118
Figura 3.23	Ensayo de pull-out - molde simple.....	118
Figura 3.24	Ensayo de pull-out - moldes doble.....	119
Figura 3.25	Equipo de amasado.....	120
Figura 3.26	Compactadora.....	121
Figura 3.27	Mesa vibradora.....	121
Figura 3.28	Sistema manual de corte. Cizalla.....	122
Figura 3.29	Sistema manual de corte. Cortador longitudinal de tubos huecos.....	123
Figura 3.30	Sistema mecánico de corte. Destructoras de documentos.....	123

Figura 3.31	Sierra de sobre-mesa Struers .....	124
Figura 3.32	Sierra de mesa para hormigón. ....	124
Figura 3.33	Prensa Instron .....	125
Figura 3.34	Prensa Instron. Adaptadores para ensayos con dinamómetro.....	126
Figura 3.35	Equipo de micro-ensayos Microtest. ....	126
Figura 3.36	Dinamómetro .....	127
Figura 3.37	Equipo para caída de peso .....	128
Figura 3.38	Corte manual de envases post-consumo. Botella de bebida gasificada. .	130
Figura 3.39	Partículas obtenidas con destructora de documentos United Office, 4 x 18 mm <sup>2</sup> .....	131
Figura 3.40	Ensayo de tracción a fibras P-NC. Secuencia de deformación. ....	135
Figura 3.41	Ensayo de tracción a fibra óptica, FO. Secuencia de deformación.....	135
Figura 3.42	Fibras inmersas en solución de hidróxido de sodio 1 molar .....	138
Figura 3.43	Fibras P-C en disolución saturada de cemento Pórland. ....	139
Figura 3.44	Fibras P-C en pasta de hidróxido cálcico. ....	139
Figura 3.45	Fibras en pasta de cemento Pórtland. ....	140
Figura 3.46	Proceso de extracción de fibras de pastas de cemento Pórtland. ....	141
Figura 3.47	Fibras en pastas mixtas. ....	142
Figura 3.48	Proceso de llenado localizado de matriz cementicia en fibras tipo halterio.....	144
Figura 3.49	Muestras embutidas en resina epoxi.....	145
Figura 3.50	Muestras cortadas con sierra circular de sobre-mesa.....	146

Figura 3.51	Moldes prismáticos especiales.....	147
Figura 3.52	Muestras para ensayo pull-out simple. ....	148
Figura 3.53	Pull-out muestra simple. Situación inicial.....	149
Figura 3.54	Pull-out muestra simple. Situación final. ....	149
Figura 3.55	Pull-out muestra doble .....	150
Figura 3.56	Pull-out doble. Colocación de fibra. ....	150
Figura 3.57	Pull-out muestra doble. Situación inicial.....	151
Figura 3.58	Pull-out muestra doble. Situación antes de la rotura.....	151
Figura 3.59	Resistencia a flexión probetas 25 x 25 x 140 mm <sup>3</sup> .....	158
Figura 3.60	Resistencia a flexión probetas 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> .....	158
Figura 3.61	Ensayo a flexión muestras 22,5 x 5 x 1 cm <sup>3</sup> .....	159
Figura 3.62	Ensayo a flexión muestras 24 x 24 x 1 cm <sup>3</sup> .....	161
Figura 3.63	Ensayo a compresión en muestras con secciones de 25 x 40 mm <sup>2</sup> .....	162
Figura 3.64	Ensayo a compresión en muestras con secciones de 40 x 40 mm <sup>2</sup> .....	162
Figura 3.65	Ejemplo de aplicación del ajuste por mínimos cuadrados.....	163
Figura 3.66	Gráfica esquemática tensión/deformación.....	164
Figura 3.67	Diagrama carga-flecha esquemático con indicación de los límites para el cálculo de tenacidad (T) e índice 30 (I <sub>30</sub> ) .....	165
Figura 3.68	Diagrama carga-flecha esquemático con indicación de los límites para el cálculo de los índice 5, 10 y 20 (I <sub>5</sub> , I <sub>10</sub> e I <sub>20</sub> ).....	166
Figura 3.69	Diagrama carga-flecha esquemático de un material elasto-plástico ideal. ....	166

Figura 3.70 Ensayo a impacto. Colocación de placa y tipos de rotura..... 167

#### CAPITULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 4.1 Fibras de envases post-consumo de PET, bebida no carbonatada (P-NC). ..... 179

Figura 4.2 Fibras de envases post-consumo de PET, bebida carbonatada (P-C). ..... 179

Figura 4.3 Fibras de envases post-consumo de bebidas lácteas (HDPE-L). ..... 180

Figura 4.4 Fibras de envases de PET reprocesados, multifilamentos (P-MF). ..... 180

Figura 4.5 Fibras de PET virgen, multifilamentos (PV-MF). ..... 180

Figura 4.6 Fibras de PET virgen termoconformado, multifilamentos (PT-MF). ..... 181

Figura 4.7 Fibras de PP de monofilamento producido para escobas (PP-E). ..... 181

Figura 4.8 Fibra óptica (FO). ..... 182

Figura 4.9 Funda de protección de fibra óptica (FP-FO). ..... 182

Figura 4.10 Resistencia a tracción de distintos tipos de fibra óptica (FO). Limite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) y tensión máxima alcanzada ( $\sigma_{tm\acute{a}x}$ ) ..... 183

Figura 4.11 Módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de distintos tipos de fibra óptica (FO).... 184

Figura 4.12 Relación tensión a tracción ( $\sigma_t$ ) / deformación ( $\epsilon$ ) en fibra óptica (FO) según marca. .... 184

Figura 4.13 Resistencia a tracción ( $\sigma_t$ ) de distintos tipos de fundas de protección de fibra óptica (FP-FO) al 100% de deformación. .... 185

Figura 4.14 Módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de distintos tipos de fundas de protección de fibra óptica (FP-FO). .... 186

Figura 4.15 Relación tensión a tracción ( $\sigma_t$ ) / deformación ( $\epsilon$ ) en funda de protección de fibra óptica (FP-FO) según marca. .... 186

Figura 4.16	Resistencia máxima a tracción ( $\sigma_{t\text{máx}}$ ) de las fibras analizadas.....	187
Figura 4.17	Límite elástico ( $\sigma_{LE}$ ) / límite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) de las fibras analizadas.....	188
Figura 4.18	Módulo de elasticidad (E) de las fibras analizadas.....	188
Figura 4.19	Diagrama tensión/deformación de fibras de polipropileno. ....	189
Figura 4.20	Diagrama tensión/deformación de fibras de PET.....	190
Figura 4.21	Fibra de HDPE-L después del ensayo de tracción hasta el 100% de alargamiento. ....	191
Figura 4.22	Diagrama tensión/deformación de las fibras con módulo elástico menor a 1 GPa. (P-MF, HDPE-L, FO y FP-FO).....	191
Figura 4.23	Índice de resistencia mecánica a flexión ( $I_{RMF}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.....	193
Figura 4.24	Secciones de rotura a flexión de muestras fibro-reforzadas con.....	195
Figura 4.25	Secciones de rotura a flexión de muestras fibro-reforzadas con FP-FO. .	195
Figura 4.26	Índice de resistencia mecánica a compresión ( $I_{RMC}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo.....	196
Figura 4.27	Índice de módulo elástico a flexión ( $I_{MEF}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.....	198
Figura 4.28	Índice de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.....	198

Figura 4.29	Diagramas carga/deformación en flexión de morteros fibro-reforzados. ....	200
Figura 4.30	Índice de energía en período elástico ( $I_{EPE}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.....	200
Figura 4.31	Fibra de P-NC tratada con solución alcalina a temperatura ambiente....	203
Figura 4.32	Fibra de P-C tratada con solución alcalina a temperatura ambiente. ....	203
Figura 4.33	Fibra de P-MF tratada con solución alcalina a temperatura ambiente. ...	203
Figura 4.34	Fibra de HDPE-L tratada con solución alcalina a temperatura ambiente. ....	204
Figura 4.35	Fibra de FO tratada con solución alcalina a temperatura ambiente. ....	204
Figura 4.36	Fibra de FP-FO tratada con solución alcalina a temperatura ambiente. .	204
Figura 4.37	Fibras de P-NC en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C. ....	206
Figura 4.38	Fibra de P-C en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C. ....	207
Figura 4.39	Fibra de P-MF en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C. ....	207
Figura 4.40	Fibra de HDPE-L en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C. ....	207
Figura 4.41	Fibra de FO en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C. ....	208
Figura 4.42	Fibra de FP-FO en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C. ....	208
Figura 4.43	Fibras vírgenes lavadas con disolución de ácido clorhídrico diluido. ....	209
Figura 4.44	Fibras en pasta cementicia con curado en baño 60 °C, sin lavar. ....	210
Figura 4.45	Residuos de pasta cementicia en fibras, curado en baño 60 °C. ....	211
Figura 4.46	Fibras en pasta cementicia con curado en baño 60 °C, zona de transición.....	213

Figura 4.47	Fibras P-NC: evolución de la degradación hasta 28 días.....	215
Figura 4.48	Fibras P-C: evolución de la degradación hasta 28 días. ....	216
Figura 4.49	Fibras P-MF: evolución de la degradación hasta 28 días. ....	217
Figura 4.50	Fibras HDPE-L: evolución de la degradación hasta 28 días. ....	218
Figura 4.51	Fibras FP-FO: evolución de la degradación hasta 28 días. ....	219
Figura 4.52	Fibras en pasta cementicia con curado en cámara durante 140 días. ....	220
Figura 4.53	Fibras en mortero de matriz de cemento Pórtland. Edad: 190 días.....	221
Figura 4.54	Fibras P-NC: comparación degradación en pasta y mortero de cemento. ....	222
Figura 4.55	Fibras P-C: comparación degradación en pasta y mortero de cemento. ....	222
Figura 4.56	Fibras de P-NC en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C. ....	224
Figura 4.57	Fibras de P-C en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.....	225
Figura 4.58	Fibras de P-MF en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.....	226
Figura 4.59	Fibras de HDPE-L en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C. ....	227
Figura 4.60	Fibras de FO en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C. ....	228
Figura 4.61	Fibras de FP-FO en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.....	229
Figura 4.62	Resistencia a tracción de fibras de PET.....	236
Figura 4.63	Módulo Elástico a tracción de fibras de PET .....	236
Figura 4.64	Diagrama tensión/deformación a tracción de fibras de PET.....	237
Figura 4.65	Fibras P-NC: degradación en pasta de cemento e hidróxido cálcico.....	239
Figura 4.66	Fibras P-C: degradación en pasta de cemento e hidróxido cálcico. ....	239

Figura 4.67	Fibras P-NC: degradación en soluciones saturadas. ....	240
Figura 4.68	Fibras P-C: degradación en soluciones saturadas.....	240
Figura 4.69	Fibras P-NC degradación en soluciones saturadas en 100 días.....	241
Figura 4.70	Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-RHA) 15 días en baño 60 °C. ....	242
Figura 4.71	Fibras P-C en matrices mixtas (CP-RHA) 15 días en baño 60 °C. ....	242
Figura 4.72	Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-FCC) 15 días en baño 60 °C. ....	243
Figura 4.73	Fibras P-C en matrices mixtas (CP-FCC) 15 días en baño 60 °C.....	243
Figura 4.74	Cristales de gelenita hidratada en morteros mixtos con FCC y MK.....	244
Figura 4.75	Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 15 días en baño 60 °C ..	245
Figura 4.76	Fibras P-C en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 15 días en baño 60 °C.....	245
Figura 4.77	Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 28 días en cámara húmeda. ....	246
Figura 4.78	Fibras P-C en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 28 días en cámara húmeda. ....	246
Figura 4.79	Fibras P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% RHA comparación curado en baño.....	247
Figura 4.80	Fibras P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% FCC comparación curado en baño. ....	248
Figura 4.81	Fibra P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% RHA comparación curados.....	248
Figura 4.82	Fibra P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% FCC comparación curados.....	248
Figura 4.83	Fibra P-NC en una matriz de cemento Pórtland a distintas edades. ....	249

Figura 4.84	Resistencia a tracción de fibras de P-NC.....	251
Figura 4.85	Módulo elástico a tracción de fibras P-NC.....	251
Figura 4.86	Resistencia a tracción de fibras de P-NC expuestas 14 meses a matriz cementicia.....	252
Figura 4.87	Módulo elástico a tracción de fibras P-NC expuestas 14 meses a matriz cementicia.....	252
Figura 4.88	Resistencia máxima a tracción ( $\sigma_{Tmax}$ ) fibras inmersas en una matriz cementicia con edades entre 28 días y 14 meses.....	253
Figura 4.89	Módulo elástico a tracción ( $E_T$ ) de fibras inmersas en matriz cementicia con edades entre 28 días y 14 meses.....	253
Figura 4.90	Curva DTG con principales procesos de pérdida de masa en pasta cementicia y pasta mixta.....	256
Figura 4.91	DTG de pastas de cemento Pórtland a distintas edades de curado.....	258
Figura 4.92	DTG de pastas de cemento Pórtland en contacto con fibras P-NC a distintas edades de curado.....	259
Figura 4.93	Fibras P-NC expuestas a una matriz de cemento Pórtland con distintos curados.....	261
Figura 4.94	DTG de pastas de cemento Pórtland, 2,5 mm de espesor, en contacto con P-NC.....	262
Figura 4.95	DTG de pastas de cemento Pórtland, película fina, en contacto con piezas de P-NC. 35-600 °C.....	263
Figura 4.96	DTG de pastas de cemento Pórtland, película fina, en contacto con piezas de P-NC, 35-1000 °C.....	264
Figura 4.97	Pasta de cemento Pórtland entre piezas de P-NC.....	264
Figura 4.98	DTG de pastas de cemento Pórtland en contacto con PMMA y P-NC.....	265

Figura 4.99	DTG de pastas mixtas, curadas 15 días en baño 45 °C. ....	266
Figura 4.100	Micrografía y microanálisis por EDS de interfaces matriz/fibra/matriz en compuesto con matriz de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC)..	268
Figura 4.101	Espectros de los principales elementos detectados por microanálisis EDS en interfaces de compuesto con matriz de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC). ....	269
Figura 4.102	Micrografía de interfaz contaminada en pasta de cemento Pórtland y fibra P-NC .....	270
Figura 4.103	Micrografía de interfaz separada en pasta de cemento Pórtland y fibra P-NC .....	270
Figura 4.104	Micrografía y microanálisis por EDS de interfaces matriz/fibra en mortero de cemento Pórtland reforzado con fibras de PET (P-NC) .....	271
Figura 4.105	Espectros de los principales elementos detectados por microanálisis EDS en interfaces de mortero de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC). ....	271
Figura 4.106	Micrografías de residuos de pasta de cemento Pórtland en fibras de P-NC. ....	272
Figura 4.107	Pull-out, gráficas fuerza/desplazamiento para muestras con 7 días de curado. ....	274
Figura 4.108	Pull-out, gráficas fuerza/desplazamiento para muestras con 28 días de curado. ....	275
Figura 4.109	Pull-out - tensión a cortante de la interfaz con distintas longitudes de fibra y a distintas edades de curado .....	276
Figura 4.110	Pull-out - tensión máxima producida en la fibra con distintas longitudes y a distintas edades de curado .....	277

Figura 4.111	Pull-out, curva fuerza/desplazamiento para muestra en moldes dobles a 28 días de curado.....	278
Figura 4.112	Índice de resistencia mecánica a flexión ( $I_{RMF}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> .....	280
Figura 4.113	Índice de resistencia mecánica a compresión ( $I_{RMC}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> .....	282
Figura 4.114	Índice de módulo elástico a flexión ( $I_{MEF}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> .....	283
Figura 4.115	Índice de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> .....	284
Figura 4.116	Tenacidad (T) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> .....	285
Figura 4.117	Índices de tenacidad ( $I_n$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> , 4%.....	285
Figura 4.118	Índices de tenacidad ( $I_n$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm <sup>3</sup> , 6%.....	286
Figura 4.119	Resistencia a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo A.....	288
Figura 4.120	Resistencia a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo B.....	289
Figura 4.121	Resistencia a flexión ( $s_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo A y B. Fibras 4 x 18 mm <sup>2</sup> ....	290
Figura 4.122	Resistencia a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo C.....	291
Figura 4.123	Resistencia a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo C, comparación de ambos sentidos.....	292
Figura 4.124	Resistencia a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo A, B y C. Fibras 4 x 18 mm <sup>2</sup> .....	293

Figura 4.125 Resistencia a flexión ( $\sigma_{\text{máx}}$ ). Comparativa fibras P-NC / P-C en muestras A y B.....	294
Figura 4.126 Fibras P-NC 1 x 18 mm <sup>2</sup> y 4 x 18 mm <sup>2</sup> .....	294
Figura 4.127 Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo A.....	295
Figura 4.128 Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo B.....	296
Figura 4.129 Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo A y B. Fibras 4x18 mm <sup>2</sup> .....	297
Figura 4.130 Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo C.....	297
Figura 4.131 Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo A, B y C. Fibras 4x18 mm <sup>2</sup> .....	298
Figura 4.132 Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ). Comparativa fibras P-NC / P-C en muestras A y B.....	299
Figura 4.133 Energía en período elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras tipo A.....	300
Figura 4.134 Índices de tenacidad ( $I_5$ , $I_{10}$ , $I_{20}$ e $I_{30}$ ) en muestras tipo A.....	300
Figura 4.135 Energía en período elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras tipo B.....	301
Figura 4.136 Índices de tenacidad ( $I_5$ , $I_{10}$ , $I_{20}$ e $I_{30}$ ) en muestras tipo B.....	302
Figura 4.137 Energía en período elástico ( $E_{PE}$ ) y tenacidad (T) en muestras tipo C.....	304
Figura 4.138 Tenacidad (T) en muestras tipo C, comparación de ambos sentidos.....	304
Figura 4.139 Índices de tenacidad ( $I_5$ , $I_{10}$ , $I_{20}$ e $I_{30}$ ) en muestras tipo C.....	305
Figura 4.140 Número de impactos para producir la primera fisura. Máximos y mínimos.....	307
Figura 4.141 Número de impactos para producir la rotura. Máximos y mínimos.....	307
Figura 4.142 Ensayo de Impacto. Tipo de rotura según dimensión de fibra.....	308

Figura 4.143	Ensayo de impacto. Rotura en muestras tipo C.2. ....	308
Figura 4.144	Resistencia máxima a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC. ....	310
Figura 4.145	Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC. ....	310
Figura 4.146	Energía en período elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC. ....	311
Figura 4.147	Índices de tenacidad ( $I_5$ , $I_{10}$ , $I_{20}$ e $I_{30}$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC. ....	312

## CAPITULO 1 – INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1	Sistema de Numeración de Plásticos. ....	34
Tabla 1.2	Composición en óxidos de un cemento portland .....	37
Tabla 1.3	Componentes principales del clinker .....	37
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. ....	39
Tabla 1.5	Características físicas y mecánicas de fibras.....	44
Tabla 1.6	Investigaciones sobre el uso de residuos plásticos como agregados de matrices cementicias. Orden cronológico. ....	64
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. ....	66

## CAPITULO 3 – METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tabla 3.1	Composición química del cemento utilizado (% en peso).....	95
Tabla 3.2	Composición química de la ceniza volante utilizada (% en peso) .....	97
Tabla 3.3	Composición química del FCC utilizado (% en peso).....	97

Tabla 3.4	Espesores de láminas obtenidas de envases post-consumo. ....	105
Tabla 3.5	Longitudes de partículas prismáticas de, aproximadamente, 1 mm de ancho. ....	105
Tabla 3.6	Longitudes de partículas prismáticas de, aproximadamente, 4 mm de ancho. ....	105
Tabla 3.7	Fibras producidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica).....	107
Tabla 3.8	Longitudes de fibras producidas de hebras y relación con ensayos. ....	107
Tabla 3.9	Amasadora. Velocidades según tipo de movimiento.....	120
Tabla 3.10	Dosificaciones de morteros fibro-reforzados para una amasada. ....	152

## CAPITULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.1	Densidad aparente de los distintos tipos de fibra óptica.....	174
Tabla 4.2	Densidad aparente de los distintos tipos de funda de protección de fibra óptica.....	175
Tabla 4.3	Densidades de los residuos sintéticos utilizados en las distintas etapas de la investigación.....	175
Tabla 4.4	Fibras producidas de envases post-consumo. Ancho: 1 mm.....	177
Tabla 4.5	Fibras producidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica).....	177
Tabla 4.6	Fibras producidas de cilindros huecos. ....	178
Tabla 4.7	Tensión máxima a tracción ( $\sigma_{t \text{ máx}}$ ), límite de elasticidad ( $\sigma_{LE}$ )/límite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) y módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de las fibras analizadas. ....	187
Tabla 4.8	Valores de pH de las pastas mixtas y el control a 1, 7 y 28 días. ....	230

Tabla 4.9	Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland a distintas edades y procedimientos de curado. ....	258
Tabla 4.10	Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland en contacto con fibras P-NC a distintas edades y procedimientos de curado.....	260
Tabla 4.11	Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland, espesor 2,5 mm, en contacto con fibras P-NC.....	262
Tabla 4.12	Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland, película fina, en contacto con piezas de P-NC. ....	263
Tabla 4.13	Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento, en contacto con PMMA y P-NC.....	265
Tabla 4.14	Porcentajes de agua combinada, CH presente y cal fijada en pastas mixtas con 50% de adición, curadas 15 días en baño a 45 °C. ....	267
Tabla 4.15	Tipos de muestras ensayadas. Codificación. ....	287
Tabla 4.16	Tenacidad (T) e índices de tenacidad ( $I_5$ , $I_{10}$ , $I_{20}$ e $I_{30}$ ) para muestras tipo A y B. Fibras 4 x 18 mm <sup>2</sup> . ....	303
Tabla 4.17	Resistencia a impacto. Número de impactos a primera fisura y a rotura. .	306
Tabla 4.18	Muestras tipo D. Características físicas y de curado.....	309



# 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].

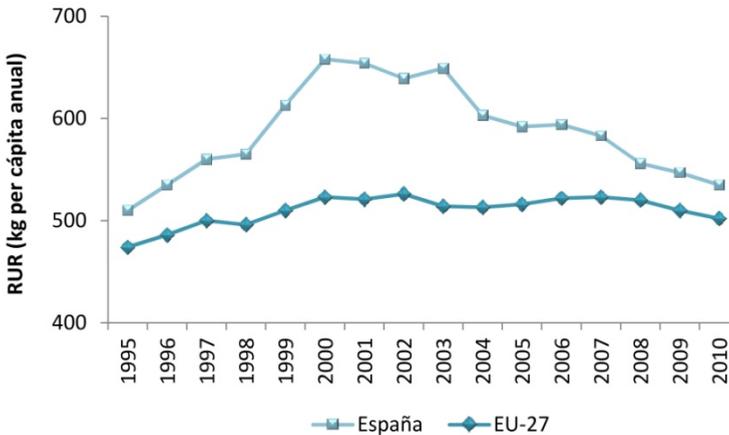
El desacoplamiento entre el crecimiento económico (PIB) y la mayor generación de residuos es uno de los retos de la sociedad. Existiendo un desacoplamiento relativo en los primeros años de este siglo, donde los residuos han crecido en menor proporción que el PIB, la meta es llegar a un desacoplamiento 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



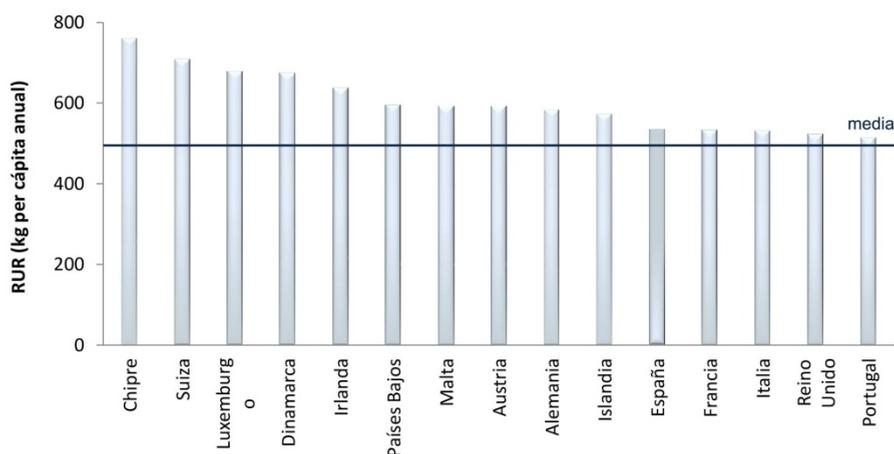
Aún no se ha conseguido una reducción absoluta mantenida en la generación de residuos, lo cual indica que continúan siendo necesarios cambios en los modelos de producción y consumo así como en las políticas de los residuos para maximizar la prevención, la reutilización y el reciclado.

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)

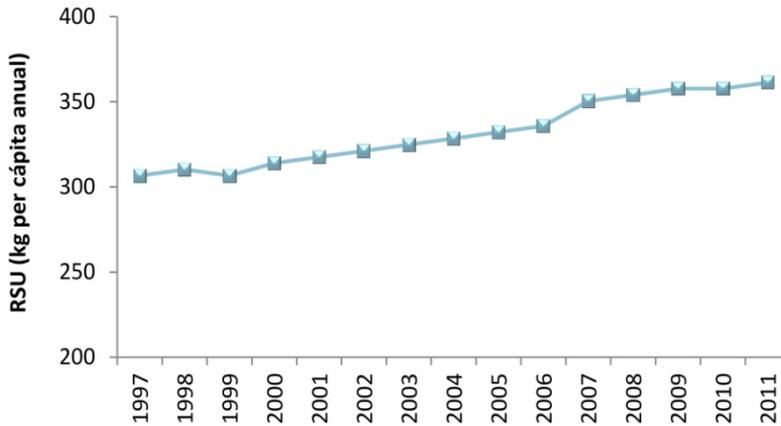
En estos países también se puede apreciar la relación directamente proporcional entre la producción de residuos y el PIB, a lo cual se puede añadir la relación directa entre la generación y el Índice de Desarrollo Humano (IDH), que combina valores de actividad económica con niveles de educación y salud.

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.

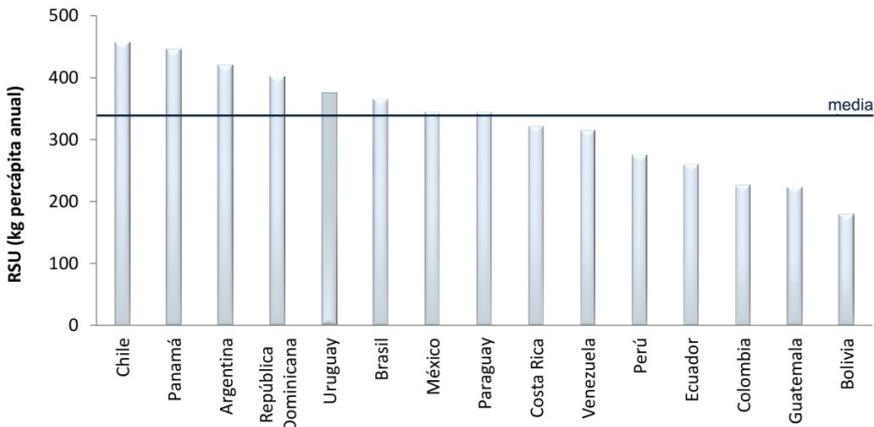
\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



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.

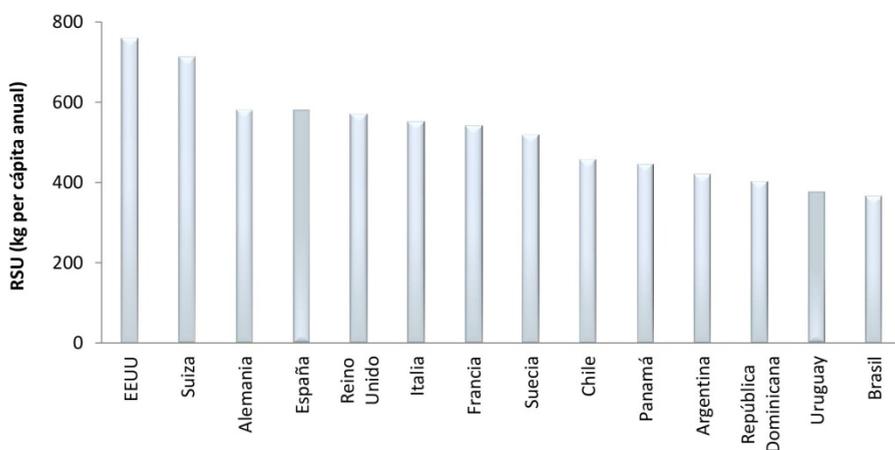
\*Elaboración propia, fuente: Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.



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

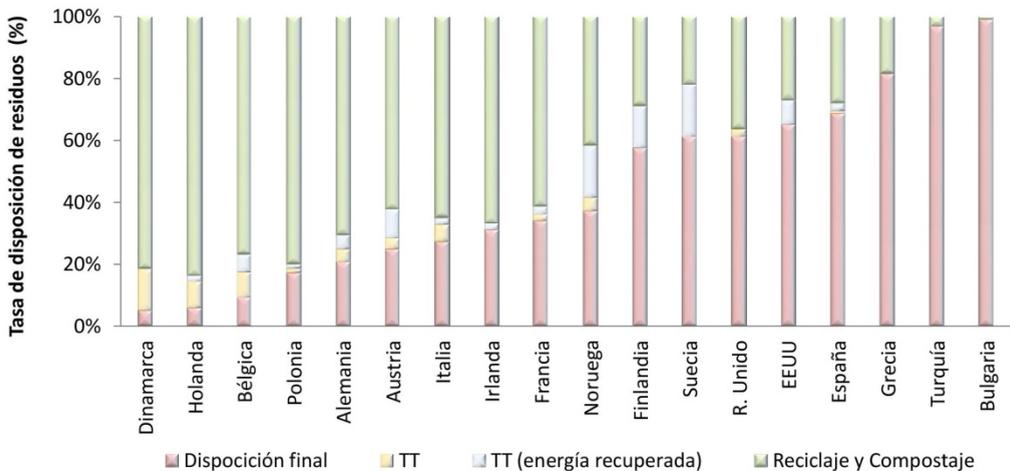
Paralelamente a estas voluntades de reducción en la producción de residuos también han ido variado las tendencias en cuanto a tratamiento y disposición final de los mismos.

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.

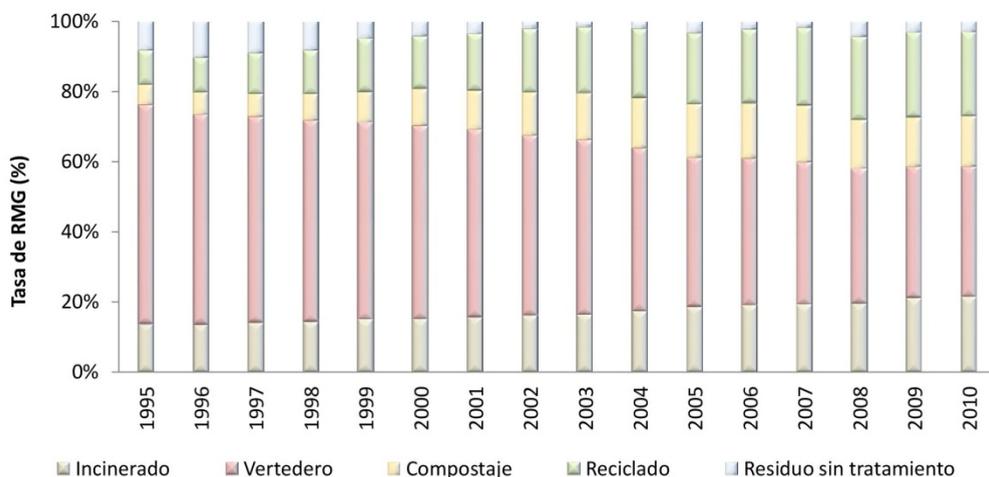
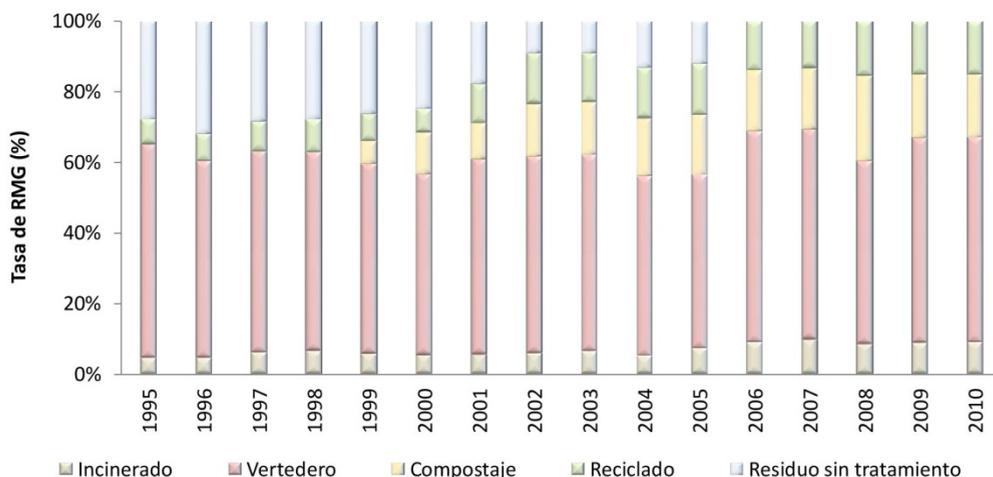


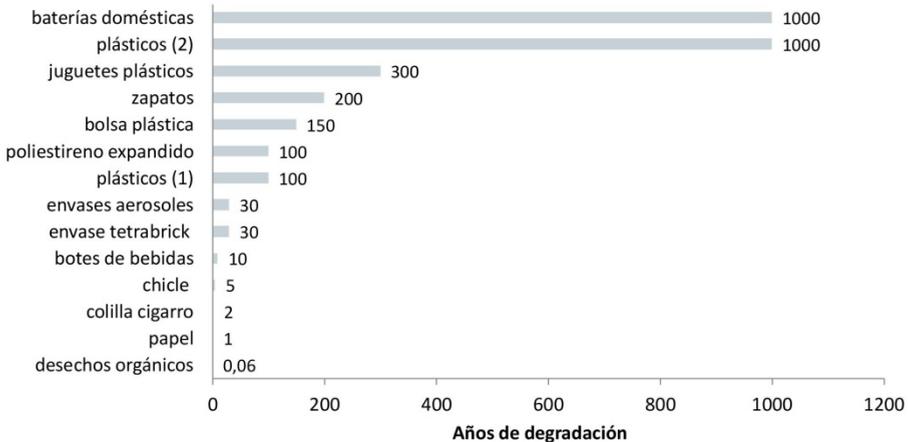
Figura 1.8 - Residuos Municipales Generados según tratamiento en España.

\*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

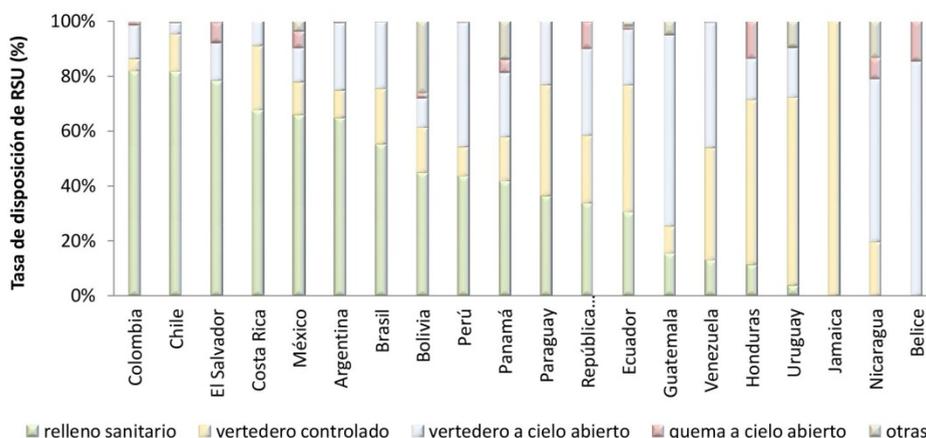
que han sido abandonados y perdieron las características para ser considerados como tal. No obstante se siguen empleando vertederos a cielo abierto, que considerados uno de los factores más contaminantes para el ambiente y perjudiciales para la salud, representan una mala gestión de los residuos sólidos. 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

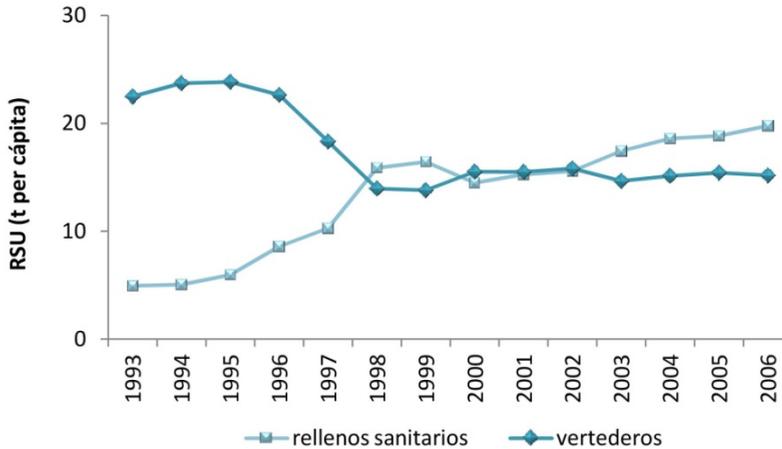
\*Elaboración propia, fuente: Informe de Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010.



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.

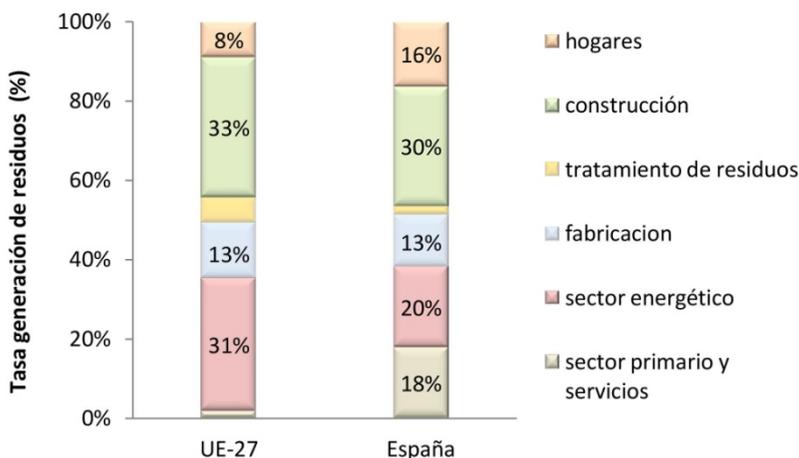
La proporción que la actividad de los hogares aporta a los residuos totales en los países de la Unión Europea (UE) se ha mantenido entre los años 2004 y 2008 en un 8%, mientras que los sectores construcción y energía aportan poco más del 30% cada uno de ellos y el Sector servicios es menor al 10% (Figura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

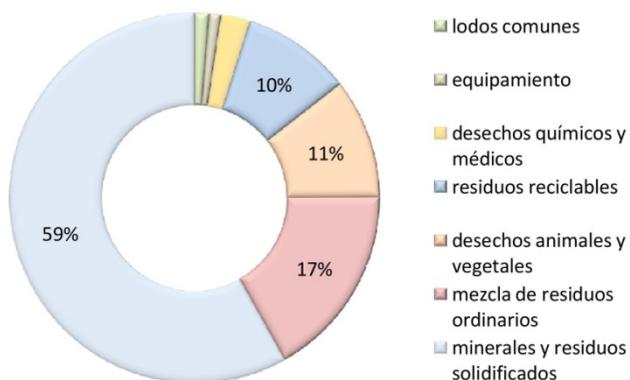
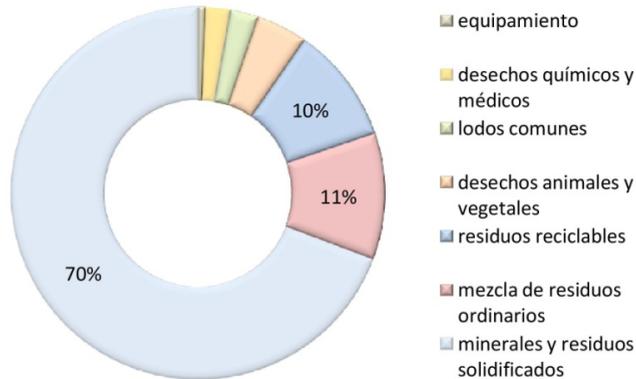


Figura 1.14 - Generación de residuos por categoría en la Unión Europea 27 países, (2008)  
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



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.

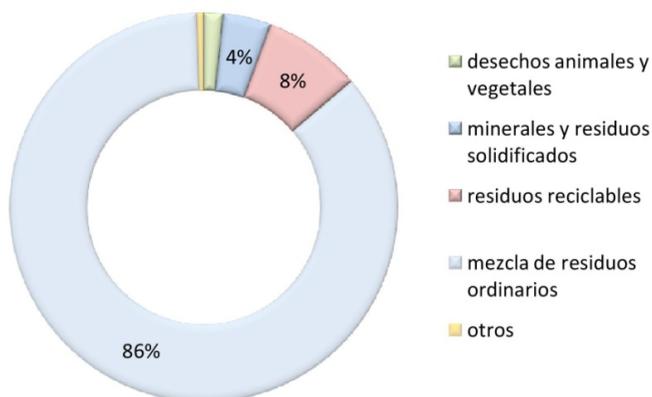
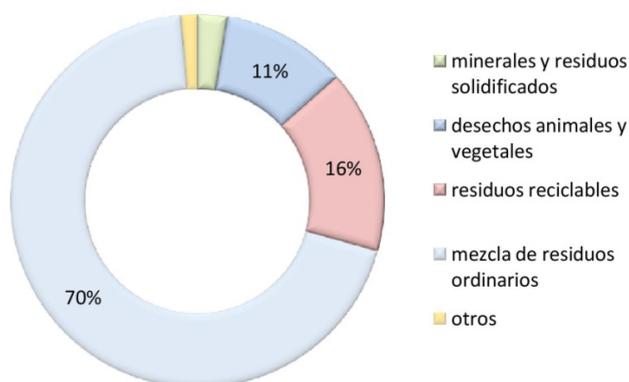


Figura 1.16 - Generación de residuos por categoría en Hogares de la Unión Europea, 2008

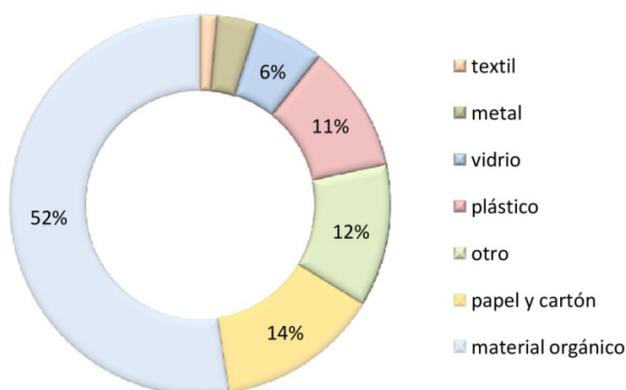
\*Elaboración propia, fuente: EUROSTAT. Estadísticas sobre residuos.



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)

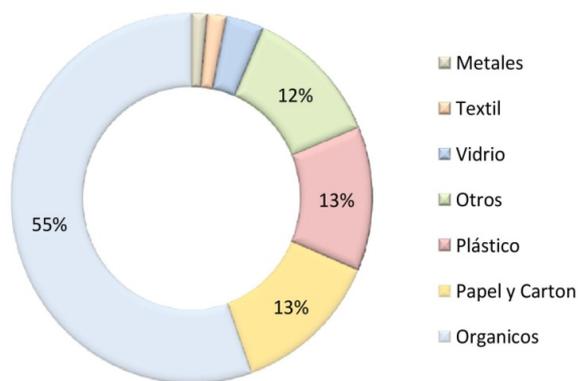
\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



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.

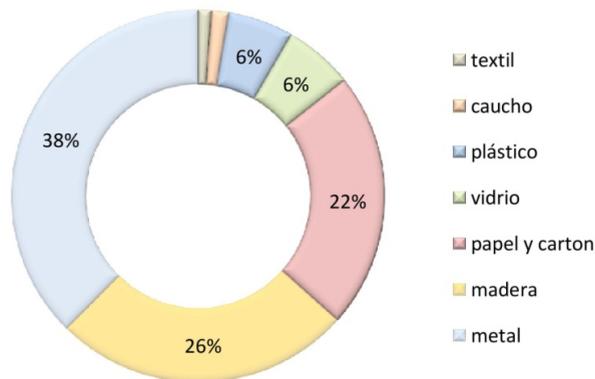
A pesar de las diferencias entre grados de desarrollo de los distintos países los materiales que se incluyen dentro de la categoría de reciclables son básicamente los mismos:

- 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.

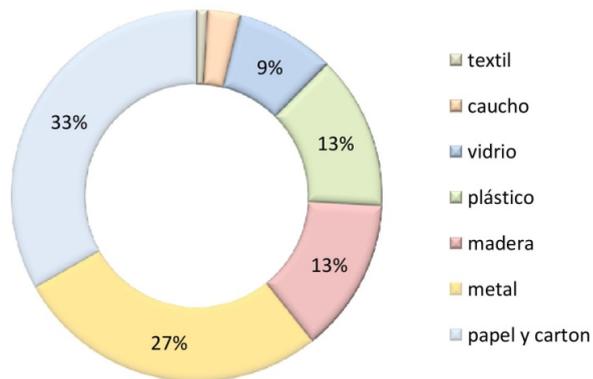
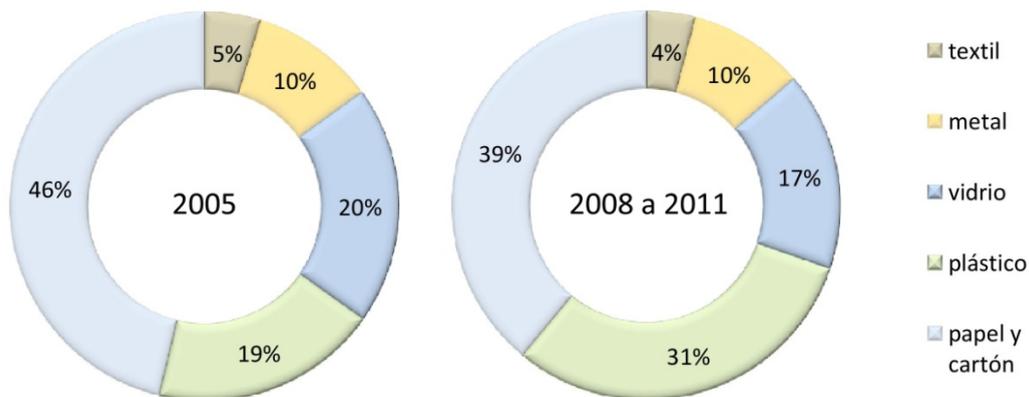


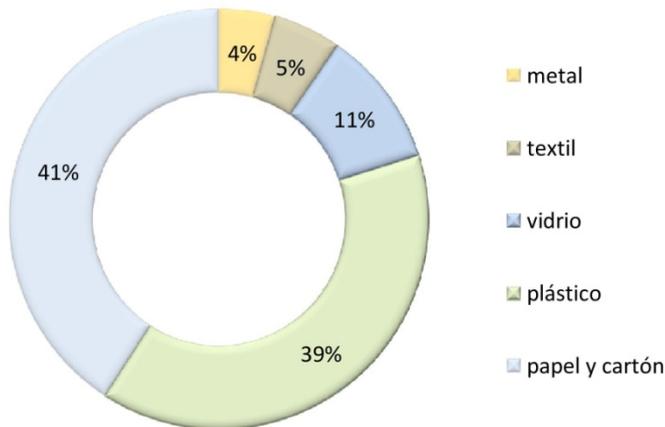
Figura 1.21 - Distribución de los residuos reciclables en México, 2005 y 2008 a 2011.  
\*Elaboración propia, fuente: SERMANAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)



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.

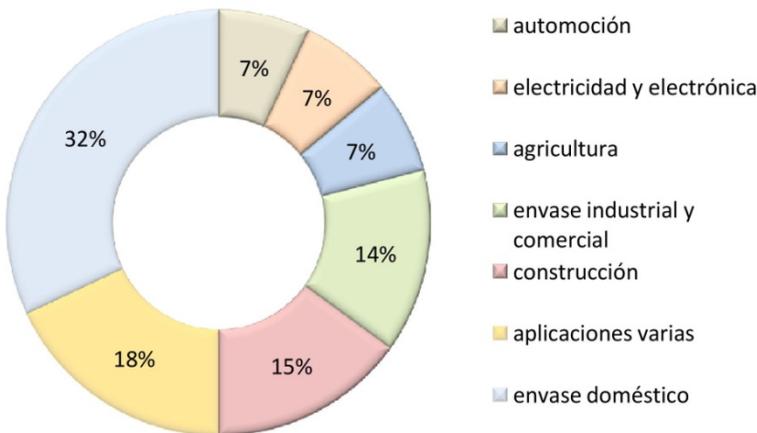
Al convertirse en trozos cada vez más pequeños, se concentran en la parte superior hasta que se desintegran, y el plástico al final llega a ser de un tamaño tan pequeño que puede ser ingerido por los organismos marinos que viven cerca de la superficie del océano. Por lo tanto, los residuos de basura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

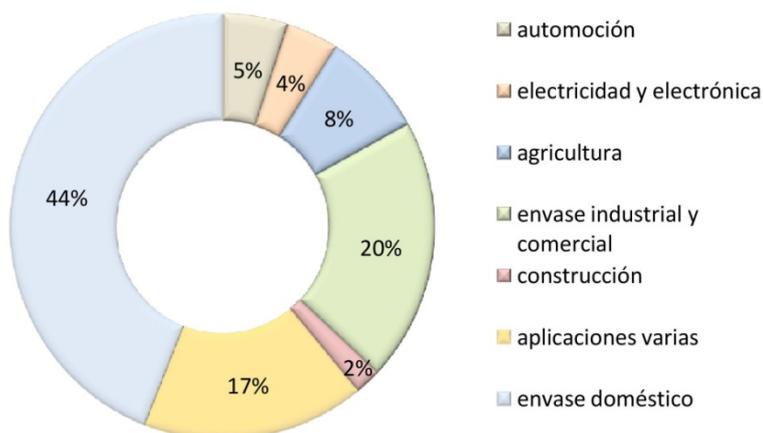


De esos plásticos empleados, se transforman en residuos computables distintas proporciones en función de la actividad que lo emplea. Es así que podemos observar que casi la mitad de residuos plásticos, 44%, proviene de los envases de uso doméstico (Figura 1.25). Sumados a los residuos provenientes de 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 Montevideo - 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.

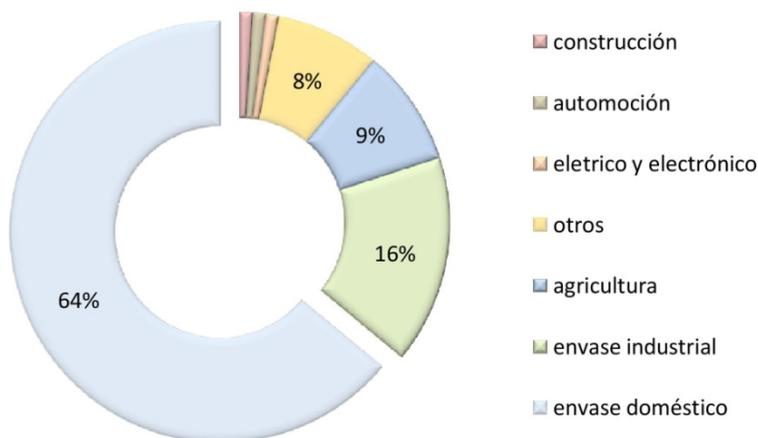
Pero la existencia de todas estas técnicas de reciclaje no implica que se recicle el 100% de los residuos plásticos que se producen. En primer lugar porque no todo residuo cuenta con la calidad necesaria para ser reciclado, sea por ser un material contaminado de pigmentos o tintes de impresos, sea porque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

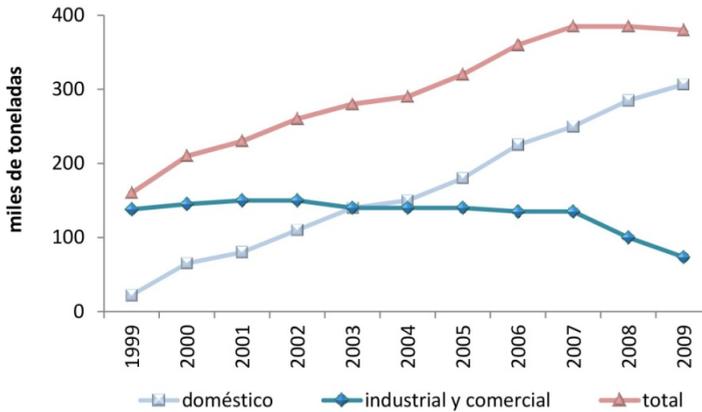
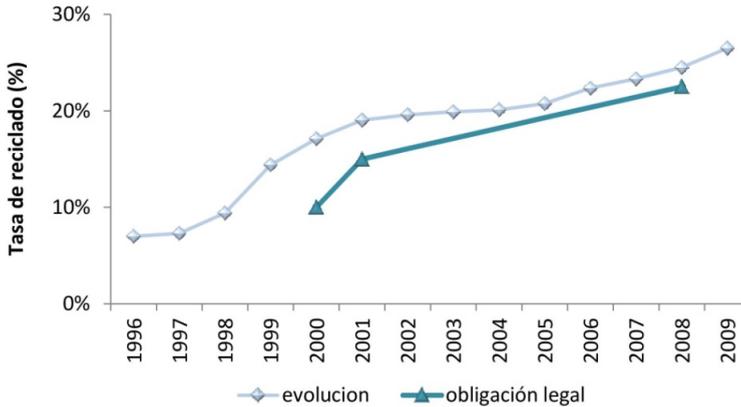


Figura 1.30 - Evolución de las tasas de reciclaje de envases plásticos en España.  
\*Elaboración propia. Fuente: Informes Cicloplast. 2009



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 silíceas o silico-aluminosas 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)

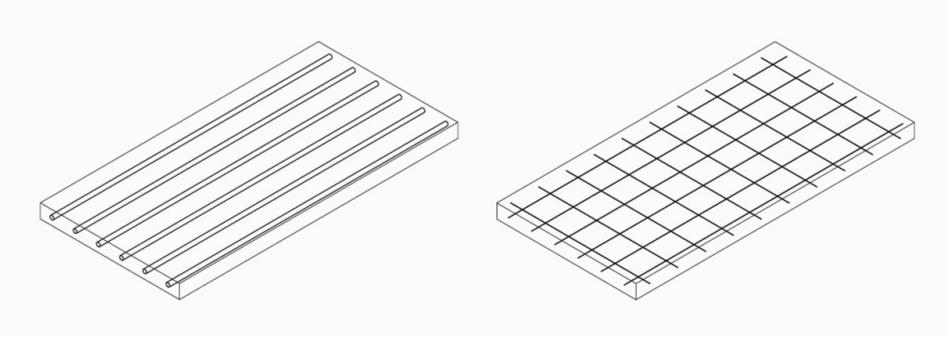
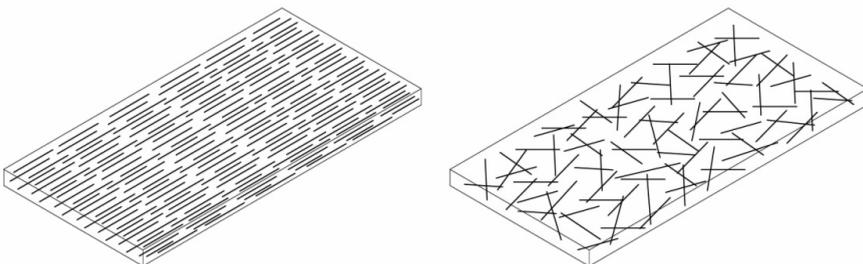


Figura 1.32 - Distribución discontinua de fibras: alineadas (izquierda), dispersas (derecha).  
Autora: Ma. Esther Fernández (agosto de 2012)



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.

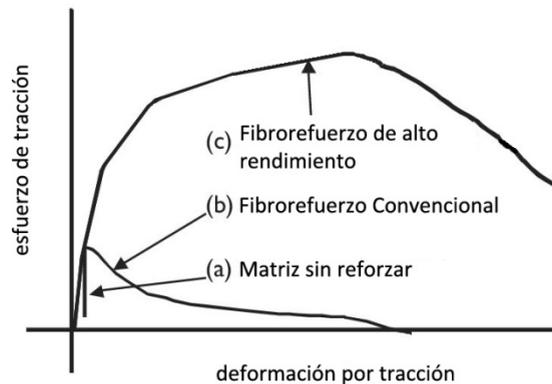
Bentur y Mindess [8] plantean que esta forma de trabajo es la que se denomina fibrorefuerzo convencional y que las fibras en estas situaciones, donde existen barras de acero, no sustituyen su función sino que la complementan (Figura 1.33)

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.

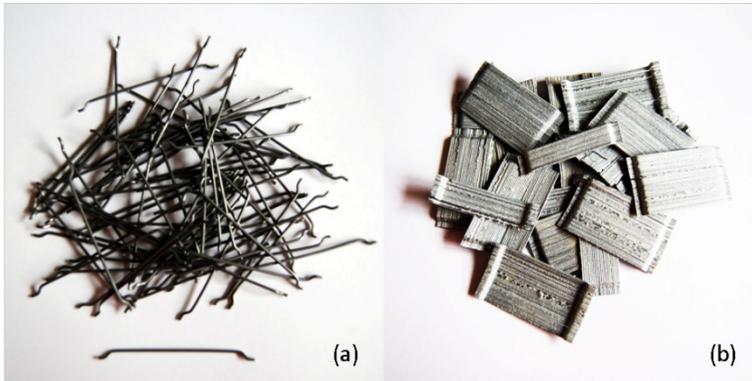
Como se ha mencionado anteriormente, estas fibras se empiezan a usar a mediados del S.XIX y han ido mejorando sus prestaciones con los años a causa de una continua investigación de ellas.

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
Widjojoko 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, entendiendo 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 termostatazada 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.kubitiz.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] Akçaözöğlü, 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] Akçaözöğlü, S., Atiş, C.D. y Akçaözöğlü, 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.

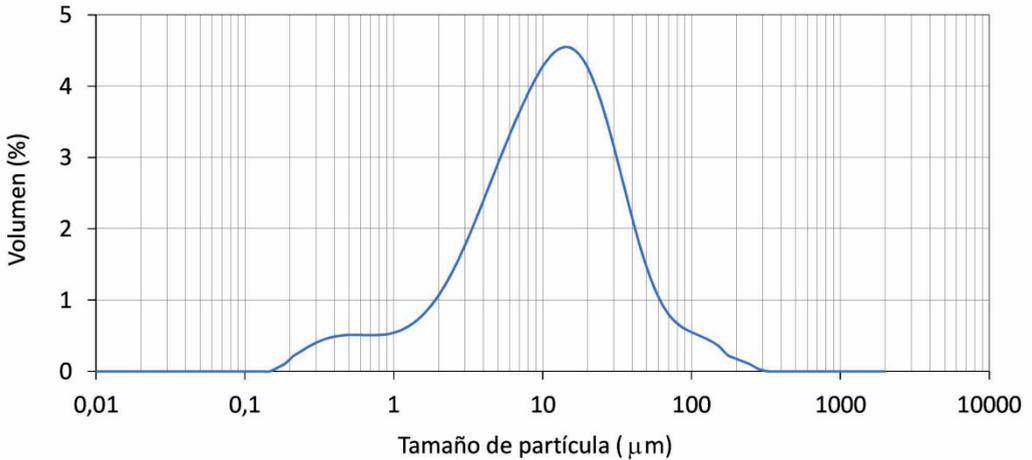
En el estudio de degradación, este cemento fue utilizado en una mezcla de 40 ml de agua destilada con 2 g de cemento Pórtland.

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.

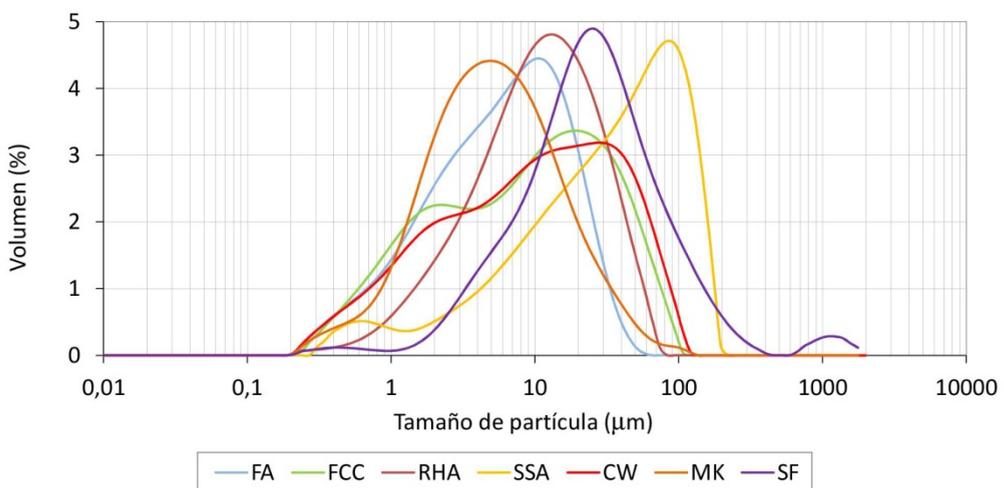
#### 3.1.4.4 Ceniza de Lodo de Depuradora (SSA)

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 Cálcico

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

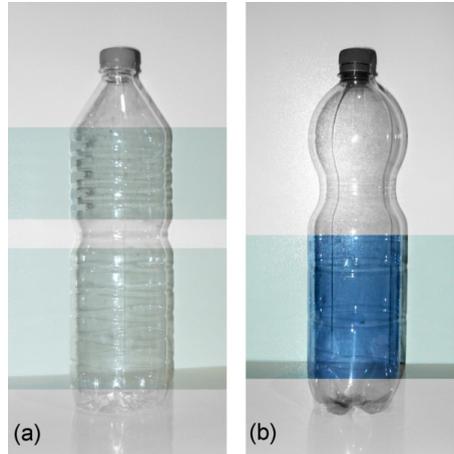
En los **envases post-consumo de PET**, fundamentalmente de bebidas de consumo diario como aguas y refrescos, encontramos dos grupos según correspondan a bebidas carbonatadas o no, los que a su vez pueden tener diferencias en la orientación de sus moléculas según el sistema utilizado en su producción.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



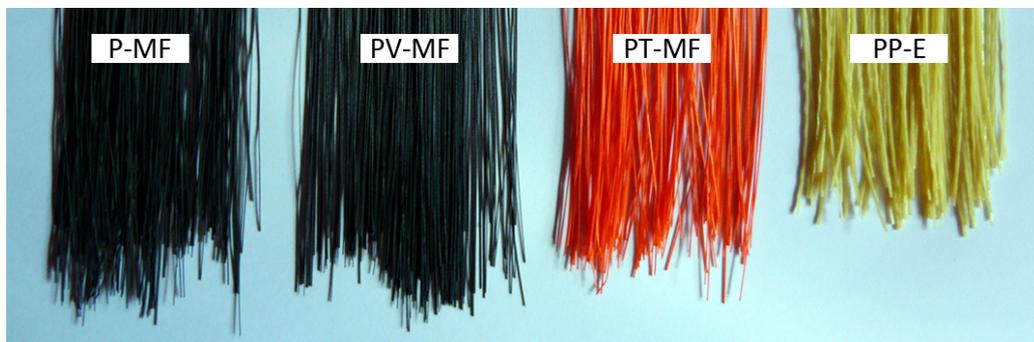
Asimismo, la empresa SP-Berner ha aportado fibras que se fabrican para la producción de escobas, obtenidas por reprocesado de escama de PET procedente de botellas post-consumo.

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

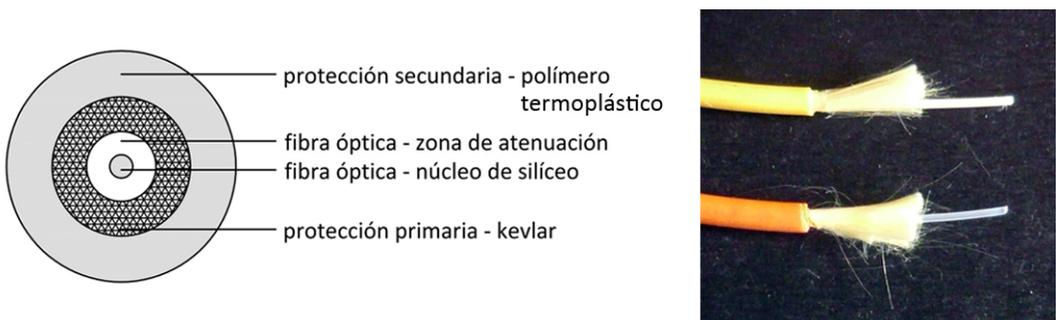
Dentro de los residuos provenientes de servicios de telecomunicaciones se ha trabajado con los de cableado interior de repartidores de fibra óptica. Estos tienen su origen en los sobrantes de poca longitud de instalaciones así como de sustituciones de tendidos existentes y fueron proporcionados por la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

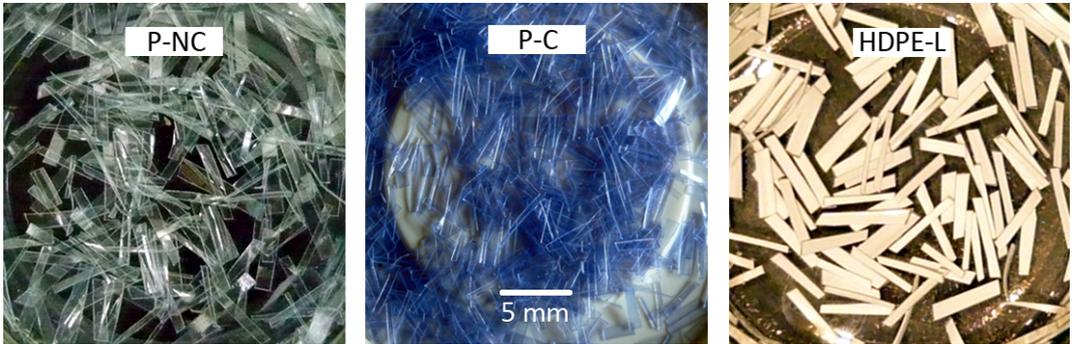
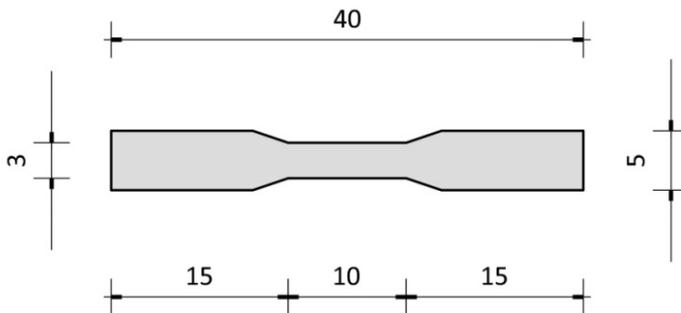


Figura 3.9 - Muestras en forma de halterio. (dimensiones en mm)



### 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.

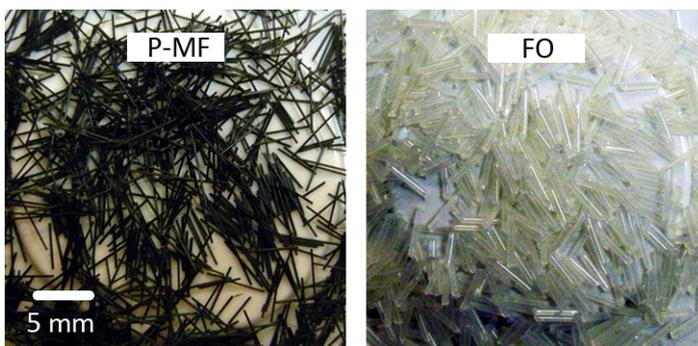
Tabla 3.7 Fibras producidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica).

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

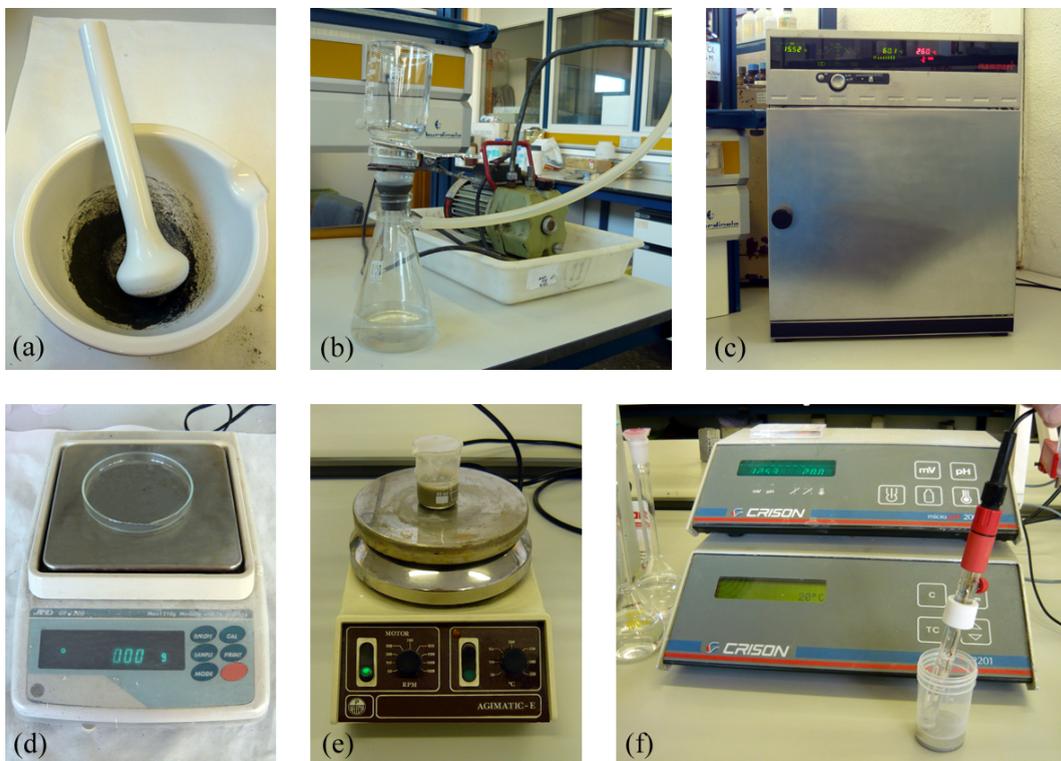


### 3.2.2 Medición de pH

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).

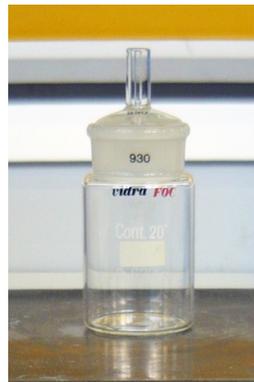
Figura 3.13 - Equipamiento para medida de pH: (a) mortero; (b) bomba de vacío; (c) estufa; (d) balanza; (e) agitador; (f) medidor de pH.



### 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).

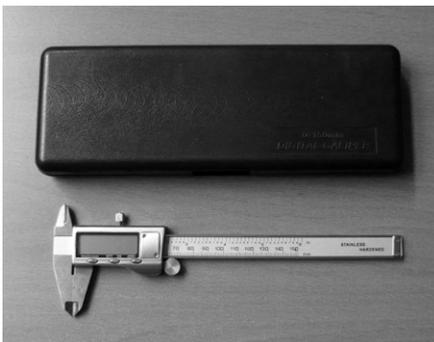
Figura 3.14 - Picnómetro de Hubbard



### 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.

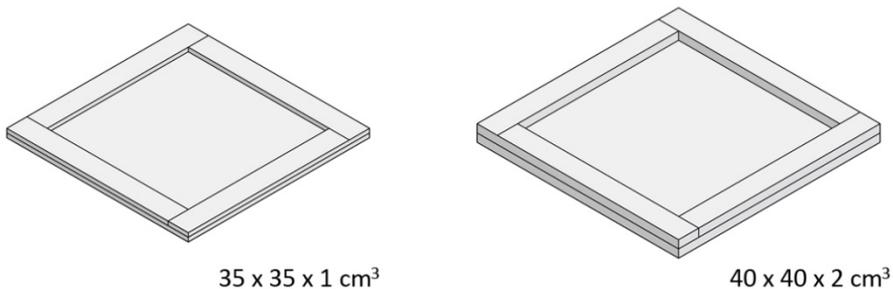
En el caso de los moldes  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , para facilitar el llenado, se utilizó una tolva metálica, de paredes verticales de 40 mm de altura. Sobre la tolva se colocó un marco fijado a la mesa de la compactadora mediante cuatro pernos roscados, para asegurar la posición correcta 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.

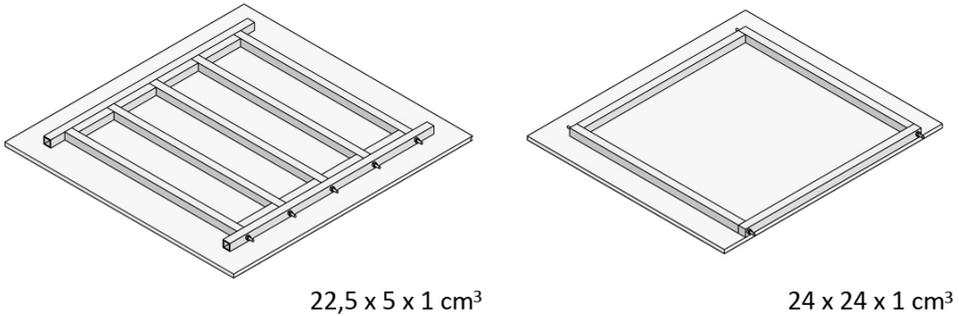


Los otros dos moldes responden a la necesidad de obtener las muestras a ensayar sin realizar cortes con sierra de disco de manera de no producir tensiones extras en las mismas.

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.

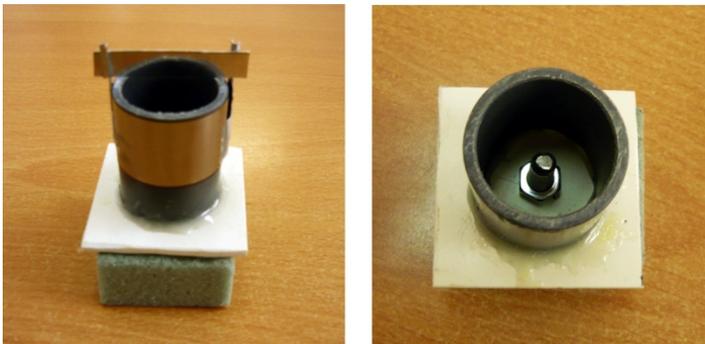


### 3.2.9.3 Pull-Out

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.

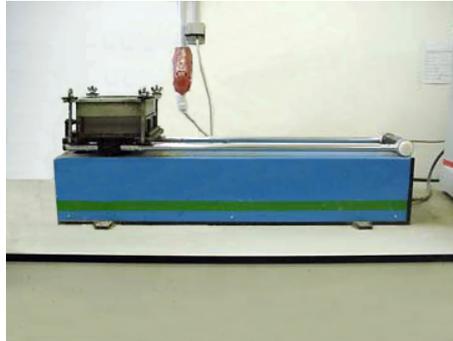
velocidad	rotación ( $\text{min}^{-1}$ )	movimiento planetario ( $\text{min}^{-1}$ )
lenta	$140 \pm 5$	$62 \pm 5$
rápida	$285 \pm 10$	$125 \pm 10$

### 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.

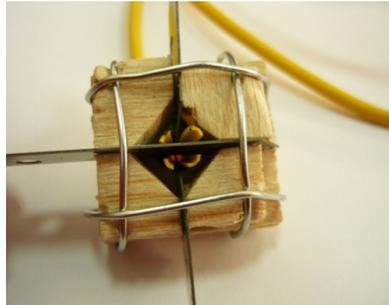
Figura 3.28 - Sistema manual de corte. Cizalla.



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



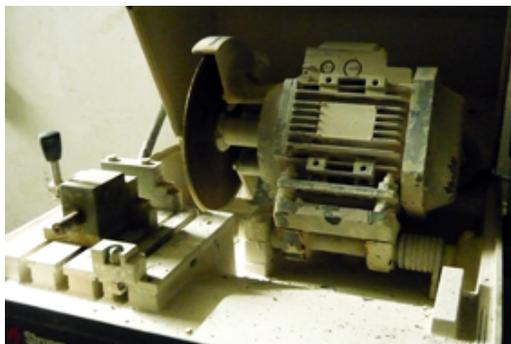
Las destructoras United Office y Rexel Prostyle, poseen un sistema de corte cruzado, produciendo mayor cantidad de desperdicio del material en el momento del corte.

### 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.

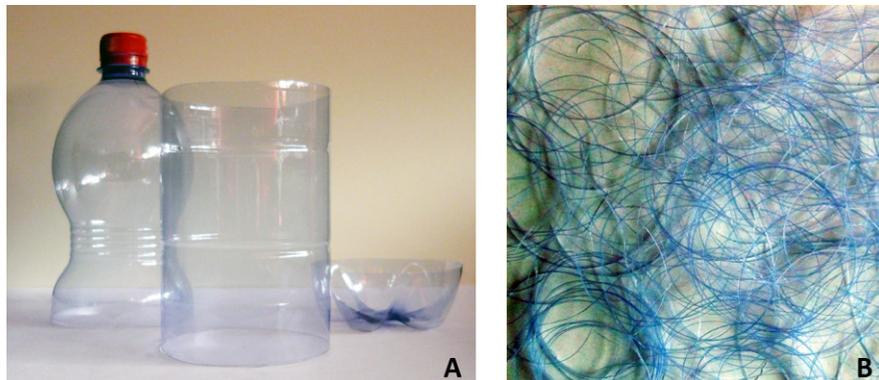
El procedimiento se adecúa a cada tipo de residuo empleado, fundamentalmente en la forma de distribución de la materia, pudiéndose dividir en tres grupos.

#### 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.

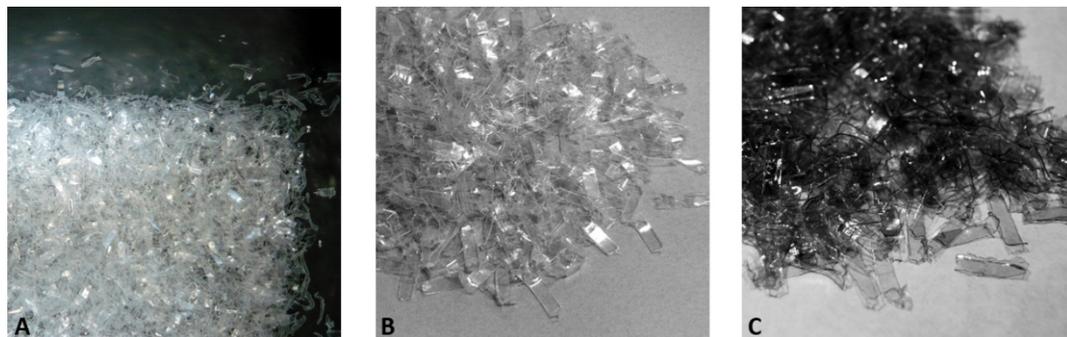
Se realizaron pruebas con distintas herramientas de corte, llegándose a obtener los mejores resultados con los equipos de destrucción de documentos que admiten clips y destruyen también discos compactos.

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:

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

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.

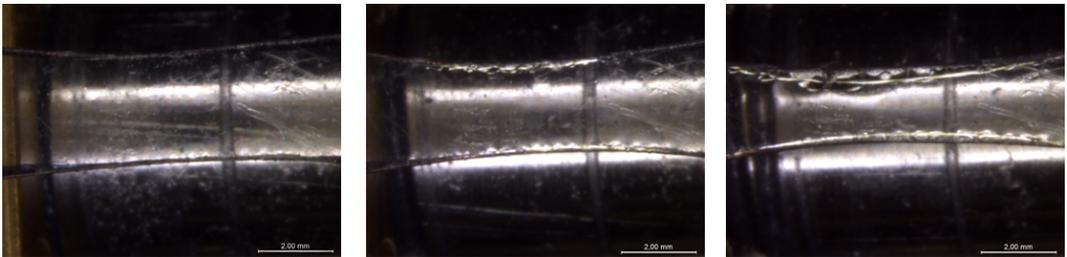
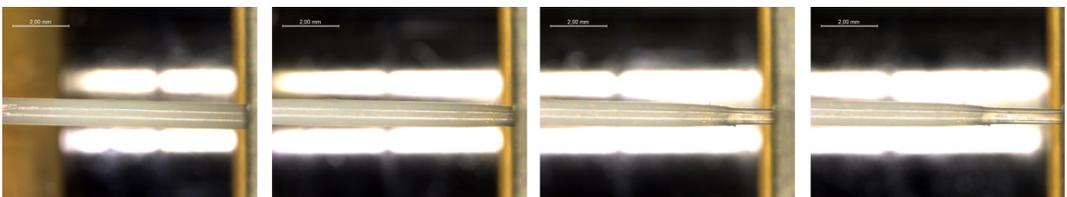


Figura 3.41 - Ensayo de tracción a fibra óptica, FO. Secuencia de deformación.



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 ( $\sigma_{Tmáx}$ ) 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.

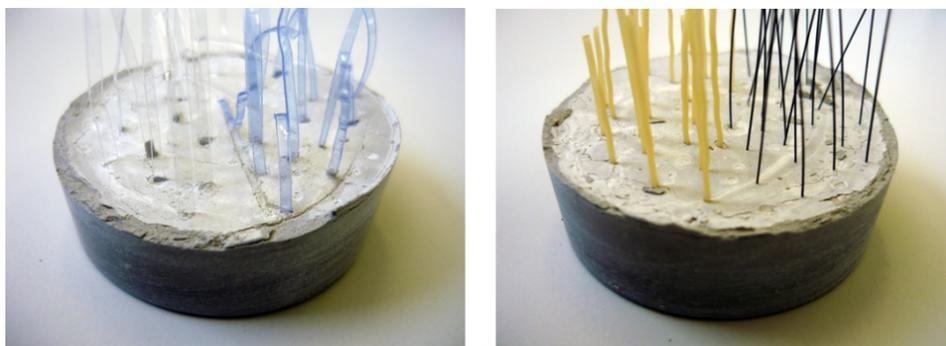
### Cemento Pórtland

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).

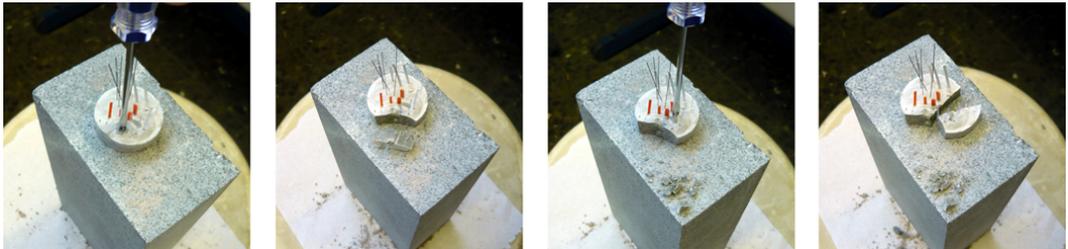
Figura 3.45 - Fibras en pasta de cemento Pórtland.  
Fibras P-NC y P-C (izquierda); Fibras PP-E y P-MF (derecha)



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.

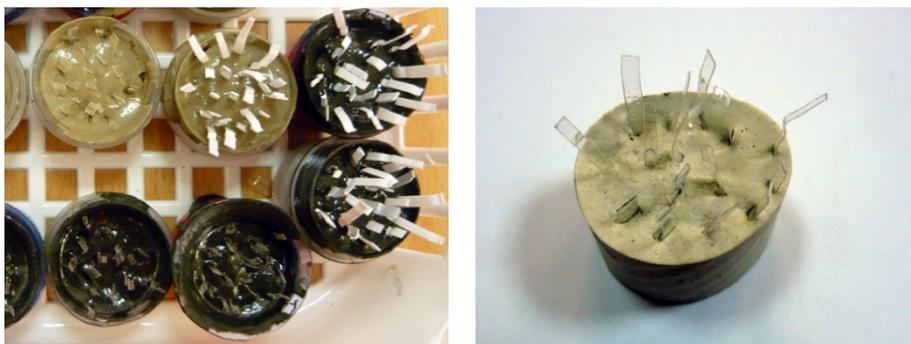
Las puzolanas sustituyeron 20% y 50% del cemento Pórtland según lo especificado en las experiencias correspondientes del Capítulo 4.

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

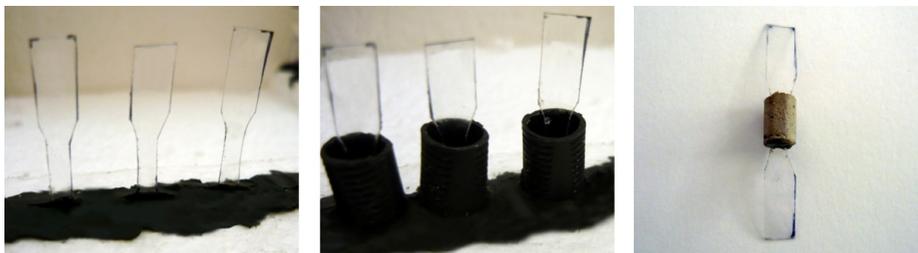
Este procedimiento es una adaptación al desarrollado en la Norma UNE-EN 14649:2006 [14] para la determinación de la resistencia remanente de las fibras de vidrio en cemento y el hormigón (ensayo SIC).

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.

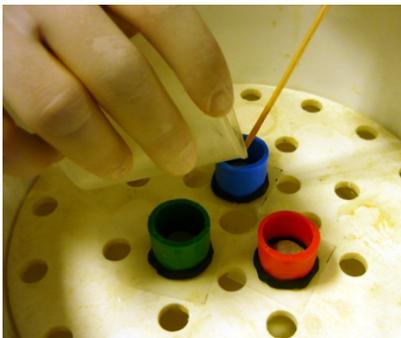
Las primeras se elaboraron con pasta de cemento Pórtland CEM I-52,5R con una relación agua/cemento 0,5, en moldes cilíndricos de 2,0 cm de diámetro y 2 cm de altura.

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.

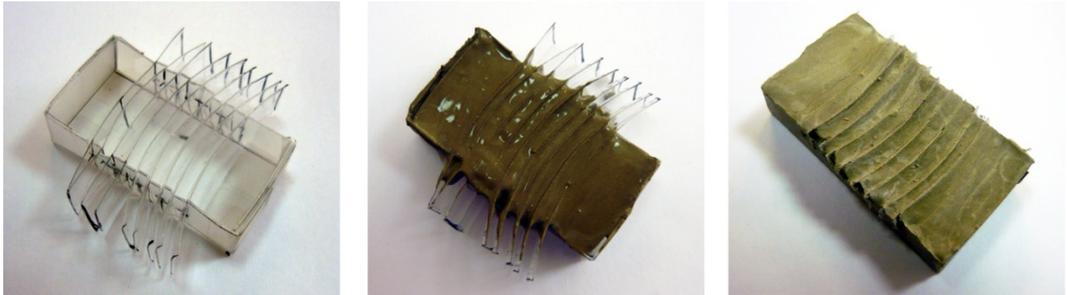
Para ello se elaboraron moldes en acetato de  $2 \times 4 \times 0,5 \text{ cm}^3$  con unas incisiones en sus caras longitudinales que permiten colocar muestras de PET de 0,5 cm de altura y 3,5 cm de longitud separadas cada 0,25 mm en el lado longitudinal como se puede observar en la Figura 3.51.

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  $\geq 90\%$ .

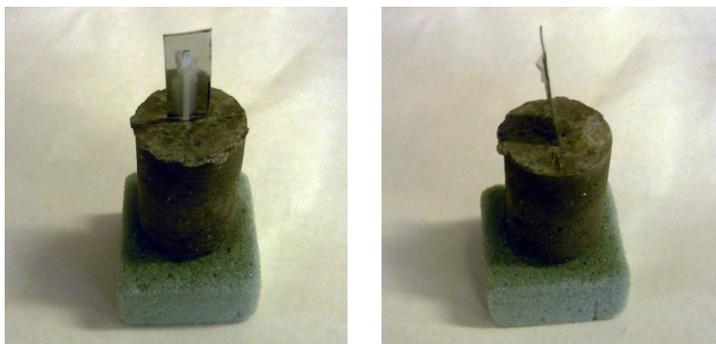
Asimismo se ensayaron fibras de igual material, 1 mm de ancho y longitudes de 12 y 20 mm, embebidas en igual tipo de mortero e iguales condiciones de curado, a edad de 28 días.

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:

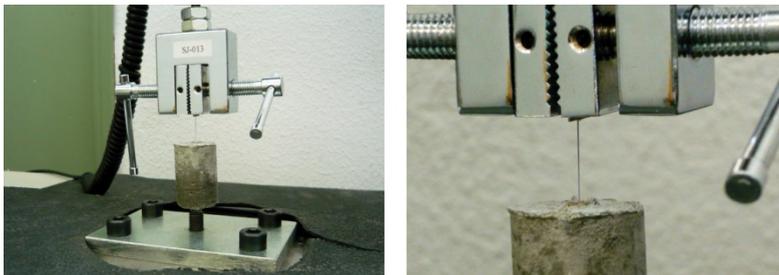
- ✓ sujetar la muestra al bastidor mediante roscado del perno incorporado en la pieza de adaptación diseñada para tal fin (Figura 3.34)
- ✓ ajustar la altura del pistón a la muestra de forma que la mordaza se aproxime lo máximo posible sin ejercer presión en la misma
- ✓ sujetar la fibra con la mordaza (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.

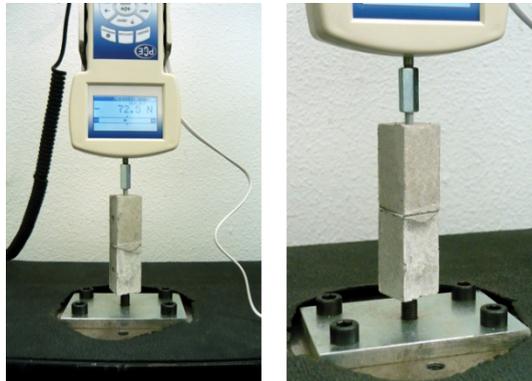
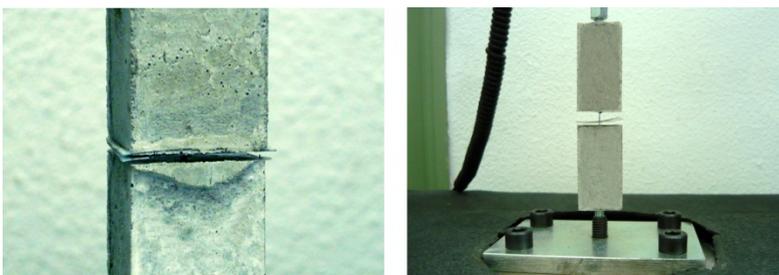


Figura 3.58 - Pull-out muestra doble. Situación antes de la rotura.



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:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{1,5 F_{m\acute{a}x} \times L_S}{w^3} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

donde

$\sigma_{Fm\acute{a}x}$  es la resistencia máxima a flexión, en MPa;

$w$  es el ancho, lado de la sección 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 flexión probetas 25 x 25 x 140 mm<sup>3</sup>

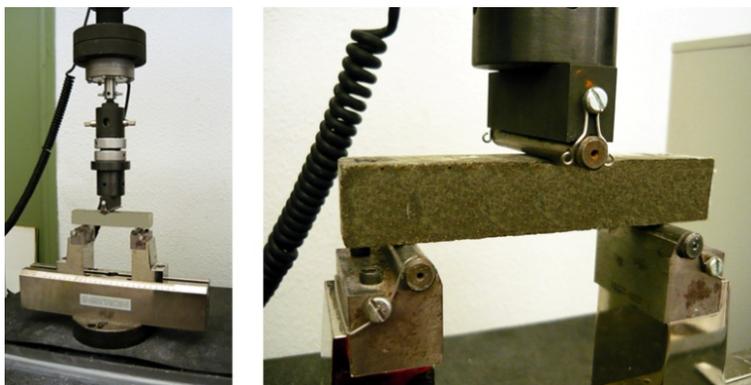
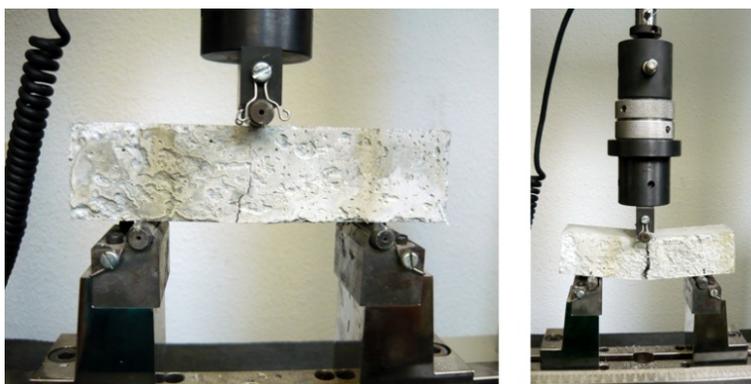


Figura 3.60 - Resistencia a flexión probetas 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>



### 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):

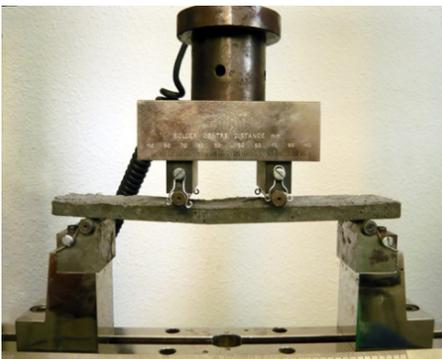
- ✓ se coloca la placa en la máquina de ensayo, con una cara mayor sobre los rodillos soporte separados 200 mm para las placas de 1 cm de espesor y 300 mm para las placas de 2 cm de espesor;
- ✓ se aplica dos cargas centrales verticales, ubicadas a tercios de la luz entre apoyos, mediante un rodillo 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 flexión muestras 24 x 24 x 1 cm<sup>3</sup>

### 3.3.7.2 Compresión

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [6] para los semi-prismas obtenidos en el ensayo a flexión de probetas prismáticas lineales. El mismo consiste en:

- ✓ se coloca el semi-prisma en el templete de ensayos a compresión (Figura 3.63);
- ✓ se centra lateralmente con relación 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 compresión,  $\sigma_{C\text{máx}}$ , en megapascales, mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_{C\text{máx}} = \frac{F_{C\text{máx}}}{a \times b} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

donde

$\sigma_{C\text{máx}}$  es la resistencia máxima a compresión, en MPa;

$a$  es el ancho de la sección en contacto con los platos, en mm;

$b$  es el largo de la sección 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  $25 \times 25 \times 140 \text{ mm}^3$ , la sección de contacto con los platos es de  $25 \times 40 \text{ mm}^2$  (Figura 3.63). En las provenientes de probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  es de  $40 \times 40 \text{ mm}^2$  (Figura 3.64) coincidiendo con la dimensión de los platos.

Figura 3.63 - Ensayo a compresión en muestras con secciones de  $25 \times 40 \text{ mm}^2$

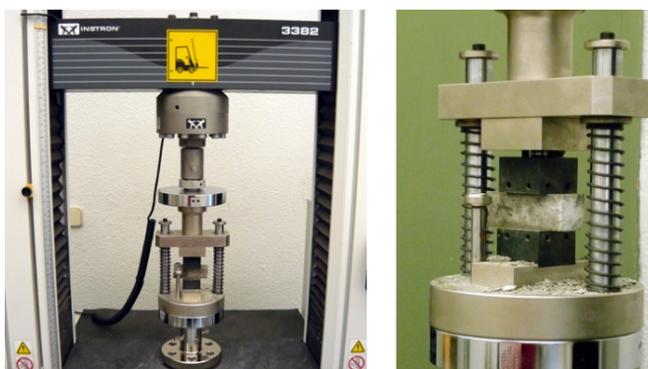
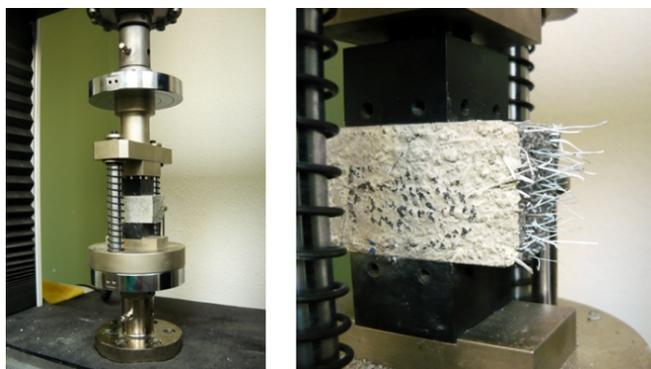


Figura 3.64 - Ensayo a compresión en muestras con secciones de  $40 \times 40 \text{ mm}^2$



### 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

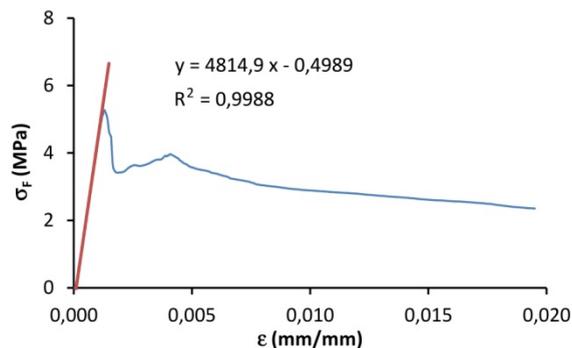
de la pendiente del tramo elástico en la curva tensión-deformación. Estos valores obtenidos no son exactos, se calcularon a los efectos de realizar una comparación de magnitudes entre muestras reforzadas con distintos tipos de fibra y con la muestra control (sin reforzar).

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.

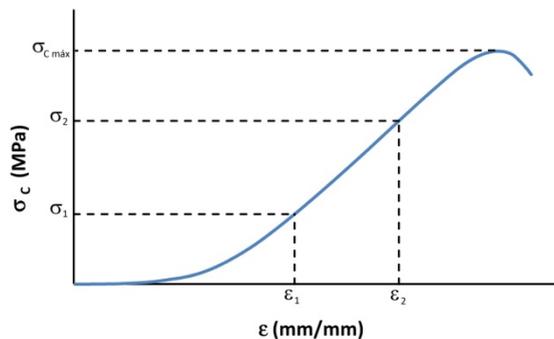
Observando la correlación de valores en los ensayos (Figura 3.66), para el cálculo del módulo elástico a compresión se utilizó la tensión y la deformación al 30% y al 70% de tensión máxima ( $\sigma_{c\ máx}$ ) según la ecuación:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} .0,001 \quad \text{Ecuación 3.12}$$

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.

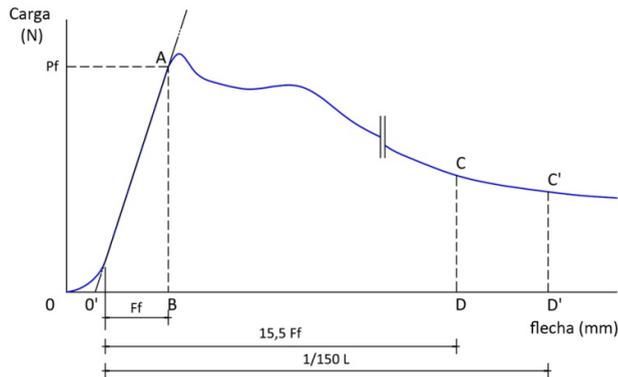


#### 3.3.7.4 Tenacidad

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.

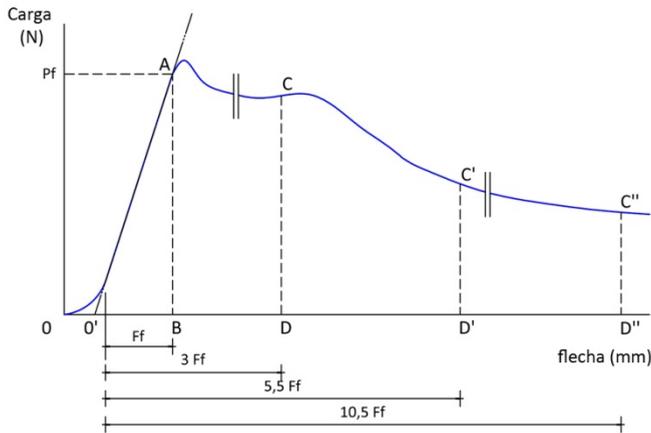
Complementando estos cálculos, en la Norma ASTM C 1018-97 [16] se indica el procedimiento para determinar los índices de tenacidad 5, 10 y 20 (Figura 3.68).

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  $O'AB$ .

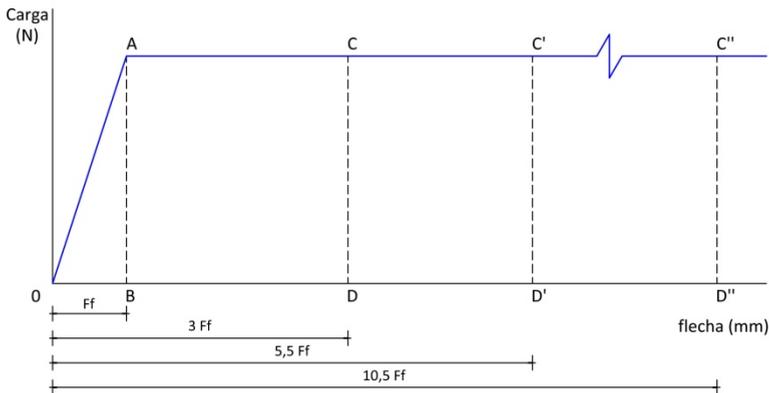
Finalmente, el índice de tenacidad  $I_{20}$  se obtiene como resultado de dividir el área bajo la curva carga-flecha desde el origen hasta el segmento C'D' (correspondiente a 10,5 veces la flecha de primera fisura, O'ACD) por el área del triángulo O'AB.

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.

# 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Este capítulo reúne los resultados obtenidos tras los trabajos de caracterización de materiales empleados para la elaboración de fibras y matrices así como los resultados alcanzados en los distintos ensayos realizados en esta investigación, conducentes a la valorización de residuos post-consumo empleados para la producción de fibras sintéticas destinadas al fibrorefuerzo de morteros de matriz cementicia.

Se realizó una caracterización físico-mecánica de los residuos disponibles, así como de los tipos de fibras que se pueden obtener con cada uno de ellos, a los efectos de comparar estas propiedades con las de fibras que existen a nivel comercial y predecir teóricamente su desempeño, así como verificarlo posteriormente con los resultados obtenidos del material compuesto.

Existiendo un número considerable de materiales y variaciones en cada uno de ellos, principalmente en fibra óptica y su funda de protección, se optó por realizar la caracterización de todos ellos y realizar una etapa de estudios preliminares que permitieran acotar el número de fibras a utilizar en siguientes instancias.

Paralelamente, se realizó un análisis primario de la degradación de estos materiales cuando están inmersos en un ambiente altamente alcalino como matrices cementicias y medios elaborados a partir de disoluciones.

En base a los resultados obtenidos, se realizaron las primeras muestras de material compuesto con el fin de comparar resultados de prestaciones, y acotar aún más el universo de residuos a emplear.

Posteriormente, delimitado el campo de la investigación al tipo de residuo que presentó mejores prestaciones en cuanto a absorción de energía del material compuesto,

concretamente se eligió PET post-consumo, se profundizó el estudio de su degradación en un medio cementicio a través de una caracterización mecánica de fibras inmersas en una matriz de cemento por un período de hasta 14 meses, se estudió la matriz cementicia en contacto con la fibra, componentes presentes en la interfaz fibra/matriz y se analizó la resistencia de adherencia entre ellas.

Por último, en virtud de los resultados obtenidos en probetas prismáticas, se realizaron una serie de ensayos de elementos laminares de mortero de cemento reforzado con fibras provenientes de envases de PET post-consumo. En ellos se analizó la influencia del tamaño de las probetas, así como la forma de producción de las fibras, sobre las resistencias mecánicas de los mismos constituyendo éste uno de los puntos de partida para futuras investigaciones.

## 4.1 Estudios preliminares

En esta etapa de la investigación se realizaron los trabajos necesarios para la caracterización de las fibras inicialmente seleccionadas así como los primeros ensayos mecánicos del material compuesto empleando mortero de cemento Pórtland.

Los residuos post-consumo utilizados para la elaboración de estas fibras, según lo expuesto en el Capítulo 3, punto 3.1.6.1, corresponden a envases post-consumo de PET (fibras P-NC y P-C), envases post-consumo de bebidas lácteas (HDPE-L), fibras elaboradas para escobas por la empresa SP-Berner (PV-MV, PT-MF y PP-E), así como los procedentes del cableado interno en sistemas de telecomunicaciones (FO y FP-FO).

La caracterización de los materiales de residuos empleados, como de las fibras en sí mismas, constituyen una base importante para el resto de las etapas. Estos valores no sólo nos permiten precisar la cantidad de fibra a adicionar sino analizar los resultados obtenidos del material compuesto en relación a estos factores intervinientes.

Asimismo, en función de la variedad de fibras disponibles, se elaboraron muestras de material compuesto con cada una de ellas a los efectos de analizar sus prestaciones y así delimitar el campo de la investigación en posteriores etapas.

### 4.1.1 Caracterización física de las fibras

La caracterización física realizada consistió en determinación de la densidad aparente de los materiales empleados en la elaboración de fibras así como la medición de éstas y el cálculo de las relaciones entre sus dimensiones.

Para ello se aplicaron los procedimientos establecidos en el punto 3.3.2 en cuanto a la determinación de densidad aparente, en la caracterización dimensional y en la caracterización superficial mediante SEM.

#### 4.1.1.1 Densidad aparente

El procedimiento empleado para esta determinación, descrito en el punto 3.3.2.1., se realizó para cada uno de los materiales disponibles.

Dada la heterogeneidad, detectada visualmente, en los residuos de fibra óptica, se determinó la densidad aparente en varios de los tipos disponibles para conocer el grado de diversidad existente (Tabla 4.1). Asimismo se procedió con la funda de protección exterior de dichas fibras al apreciarse, en su manipulación, que presentaban flexibilidades distintas, independientemente del color el cual responde a las características ópticas del conductor y no al material empleado para la misma (Tabla 4.2).

Apreciándose entre 20 y 30 % de variación en estas densidades se optó utilizar los residuos correspondientes a la marca SIECOR, modelo C-8, el cual cuenta con un valor intermedio de densidad tanto en la fibra óptica como en su protección.

Tabla 4.1 - Densidad aparente de los distintos tipos de fibra óptica

marca	densidad (g/cm <sup>3</sup> )
<b>BICC CCSA 1997</b>	0,951
<b>NKF multimode</b>	0,982
<b>SIECOR 07776 FEET</b>	0,995
<b>COF 1001 CC</b>	1,005
<b>FIBROCO 90</b>	1,098
<b>SIECOR SMF-21 06082 FEET</b>	1,097
<b>SIECOR C-8 03100 FEET (*)</b>	<b>1,102</b>
<b>OPTRAL 05/06</b>	1,201
<b>OPTRAL 2006</b>	1,270

(\*) Fibra óptica empleada para refuerzo

Tabla 4.2 - Densidad aparente de los distintos tipos de funda de protección de fibra óptica

marca	densidad (g/cm <sup>3</sup> )
<b>BICC CCSA 1997</b>	1,222
<b>FIBROCO 90</b>	1,222
<b>SIECOR SMF-21 06082 FEET</b>	1,390
<b>NKF multimode</b>	1,417
<b>SIECOR 07776 FEET</b>	1,417
<b>SIECOR C-8 03100 FEET (*)</b>	<b>1,420</b>
<b>OPTRAL 2006</b>	1,521

(\*) Fibra óptica empleada para refuerzo

El mismo procedimiento se empleó para determinar la densidad aparente de todos los materiales disponibles, quedando expresados los valores obtenidos en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Densidades de los residuos sintéticos utilizados en las distintas etapas de la investigación.

Material	densidad (g/cm <sup>3</sup> )
<b>P-NC</b>	
PET envase bebida no carbonatada	1,308
<b>P-C</b>	
PET envase bebida carbonatada	1,342
<b>P-MF</b>	
PET reprocesado residuo de envases, multifilamentos	1,106
<b>PV-MF</b>	
PET material virgen, multifilamentos	1,600
<b>PT-MF</b>	
PET material virgen termoconformado, multifilamentos	0,625
<b>PP-E</b>	
Polipropileno de escobas	0,833
<b>HDPE-L</b>	
Polietileno de alta densidad de envases lácteos	0,958
<b>FO</b>	
Fibra óptica SIECOR C-8	1,102
<b>FP-FO</b>	
Funda de protección exterior de fibra óptica SIECOR C-8	1,420

#### 4.1.1.2 Relaciones dimensionales.

Considerando que en los materiales de los residuos utilizados existen dimensiones establecidas, (espesor en láminas, sección en elementos lineales y diámetros en los tubos huecos) se cuantificaron estos valores y se realizaron las mediciones de las otras dimensiones a los efectos de caracterizar las fibras obtenidas.

En esta etapa, la longitud de fibra utilizada surge por asimilación a la menor longitud presente en fibras comerciales de polipropileno (6 mm), siendo esta dimensión común a todos los materiales empleados.

A partir de un parámetro comparable de la sección, diámetro ( $\phi$ ), se calculó la esbeltez ( $\lambda$ ) de las mismas con el fin de analizar la influencia de estas proporciones en las resistencias mecánicas del material compuesto.

Al existir secciones no circulares, para ellas se debió obtener un diámetro equivalente ( $\phi_e$ ) según procedimiento indicado en el Capítulo 3, punto 3.3.2.2.

Reiterando la clasificación indicada en el Capítulo 3, punto 3.1.6.2., se expresan los resultados según la forma de presentación del material en los residuos.

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

Estos materiales presentan espesores determinados por la forma de producción de los envases, expresados anteriormente en la Tabla 3.4 del Capítulo 3, por lo cual la sección obtenida de los cortes es una sección aproximadamente rectangular.

Con los cortes manuales empleados en esta primera etapa el ancho mínimo obtenido es de  $1 \pm 0,5$  mm, diferenciándose las secciones solamente por los espesores de los distintos envases. Las longitudes ( $L$ ) obtenidas presentaron una tolerancia de  $\pm 0,5$  mm.

A estas secciones rectangulares se les determinó el diámetro equivalente ( $\phi_e$ ) y esbeltez ( $\lambda = L/\phi_e$ ) según procedimiento de la Norma UNE-EN 14889-2:2008 [1] indicado en punto 3.3.2.2. , valores que se pueden observar en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 - Fibras producidas de envases post-consumo. Ancho: 1 mm  
Diámetro equivalente ( $\phi_e$ ) y esbeltez ( $\lambda$ ).

	L (mm)	sección (mm <sup>2</sup> )	$\phi_e$ (mm)	$\lambda$
<b>P-NC</b>	6 mm	0,274	0,59	10,16
<b>P-C</b>	6 mm	0,251	0,56	10,62
<b>HDPE-L</b>	6 mm	0,318	0,64	9,43

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

En estas fibras la sección viene establecida en origen, con una forma aproximadamente circular, habiéndose determinado los diámetros de las mismas por el valor medio de 10 medidas individuales.

Se ha definido su esbeltez ( $\lambda = L / \phi$ ) con la media de los diámetros reales ( $\phi$ ) y la longitud (L) (Tabla 4.5). En estos materiales, las longitudes (L) obtenidas también presentaron una tolerancia de  $\pm 0,5$  mm.

Tabla 4.5 -Fibras producidas de elementos lineales (filamentos y fibra óptica).  
Longitud (L), diámetro ( $\phi$ ) y esbeltez ( $\lambda$ ).

Fibra	L (mm)	$\phi$ (mm)	$\lambda$
<b>P-MF</b> PET residuo de envases, multifilamentos	6	0,28	21,43
<b>PV-MF</b> PET material virgen, multifilamentos	6	0,28	21,43
<b>PT-MF</b> PET material termoconformado, multifilamentos	6	0,38	15,79
<b>PP-E</b> Polipropileno de escobas	6	0,83	7,23
<b>FO</b> Fibra óptica SIECOR C-8	6	0,90	6,67

NOTA: Las fibras de polipropileno comerciales de 6 mm de longitud se emplean para reducir la fisuración superficial y presentan una esbeltez de 190, aproximadamente.

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

Estos materiales, fundas de protección de fibra óptica (FP-FO), también tienen la sección definida de origen, variando según el residuo las medidas de sus diámetros (externo  $\phi_{ext}$  e interno  $\phi_{int}$ ), con el espesor correspondiente ( $e$ ) a la diferencia entre los mismos.

Según se mencionó en el punto 4.1.1.1, se optó por utilizar el material procedente de una sola firma comercial, por lo que las dimensiones, diámetros y espesor, son valores constantes.

En esta etapa de la investigación se empleó con la sección de origen, tubular, calculándose la esbeltez con la relación entre la longitud ( $6 \pm 0,5$  mm) y el diámetro exterior de la misma ( $\lambda = L/\phi_{ext}$ ) como se puede observar en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 - Fibras producidas de cilindros huecos. Longitud (L), diámetro equivalente ( $\phi_e$ ) y esbeltez ( $\lambda$ ).

	L (mm)	$\phi_{ext}$ (mm)	$\phi_{int}$ (mm)	e (mm)	sección (mm <sup>2</sup> )	$\lambda$
<b>FP-FO</b> SIECOR C-8	6	2,97	1,79	0,59	4,411	2,02 <sup>(*)</sup>

$\phi_{ext}$  = diámetro exterior;  $\phi_{int}$  = diámetro interior; e = espesor  
<sup>(\*)</sup> esbeltez determinada con el diámetro exterior del tubo

Con esta longitud de fibra se observa que en todos los materiales se obtiene una esbeltez, o relación de aspecto, muy inferior a los valores típicos que se encuentran en el intervalo de 30 a 90 para algunos autores [2] y entre 50 y 100 para otros [3].

Las fibras producidas por la empresa SP-Berner para la fabricación de escobas, PV-MF y PT-MF, presentan las mayores esbelteces con esta longitud, pero continúa siendo menor al valor 30.

En esta etapa de la investigación, en la búsqueda de obtener resultados comparativos, de fibras elaboradas a partir de los residuos y fibras de polipropileno comercial, se optó por mantener la longitud de  $6 \pm 0,5$  mm si bien no presentan relaciones de aspecto adecuadas según datos bibliográficos.

#### 4.1.1.3 Caracterización superficial mediante microscopia

Complementando las caracterizaciones físicas desarrolladas anteriormente, las fibras fueron observadas en el microscopio electrónico de barrido (SEM), con el fin de analizar la textura superficial de las mismas, y así tener más elementos para interpretar posteriormente su comportamiento en la adherencia con la matriz.

Como se aprecia en las Figuras 4.1 y 4.2, las fibras elaboradas a partir de envases post-consumo de PET presentan una textura superficial sin relieves, con pequeñas irregularidades en las secciones de corte.

Figura 4.1 - Fibras de envases post-consumo de PET, bebida no carbonatada (P-NC).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)

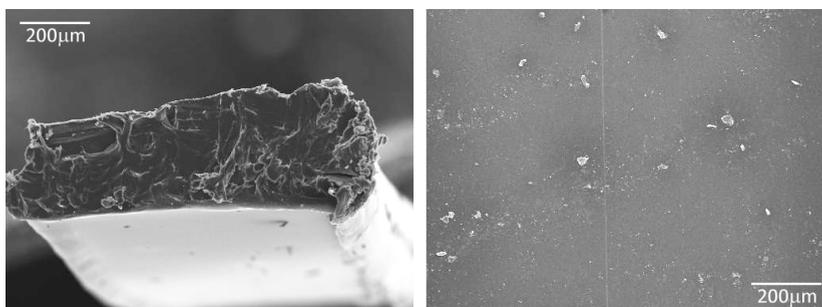
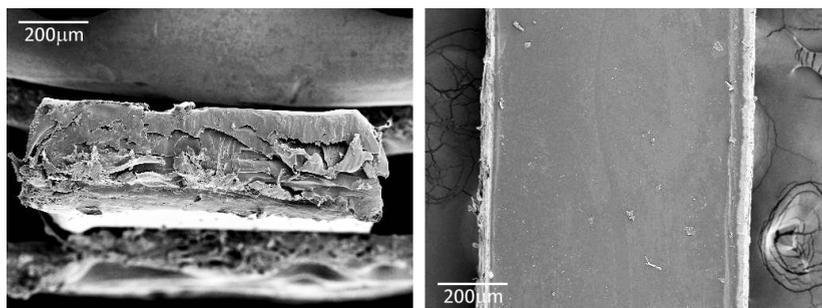
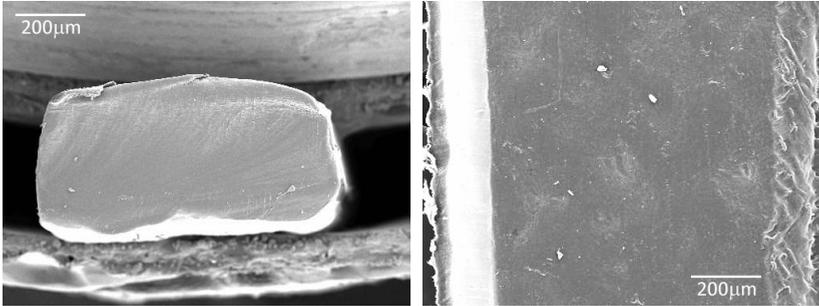


Figura 4.2 - Fibras de envases post-consumo de PET, bebida carbonatada (P-C).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



Sin embargo, las fibras elaboradas a partir de envases post-consumo de HDPE, presentan en una de sus superficies mayores (correspondiente al interior del envase), pequeñas ondulaciones y una sección de corte limpia, sin resaltes. (Figura 4.3).

Figura 4.3 - Fibras de envases post-consumo de bebidas lácteas (HDPE-L).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



En las fibras elaboradas a partir de filamentos se puede apreciar que las producidas con PET para escobas presentan similar textura superficial entre sí. (Figuras 4.4 a 4.6).

Figura 4.4 - Fibras de envases de PET reprocesados, multifilamentos (P-MF).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)

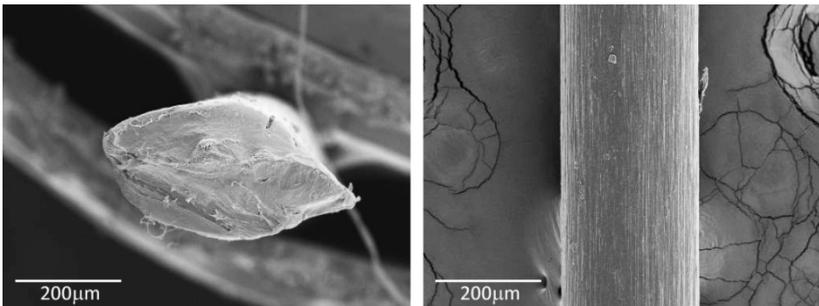


Figura 4.5 - Fibras de PET virgen, multifilamentos (PV-MF).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)

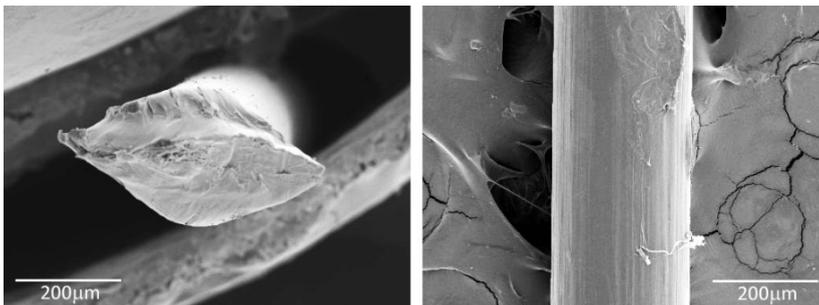
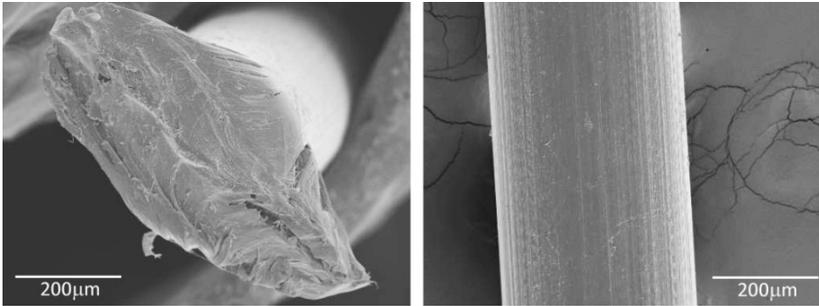


Figura 4.6 - Fibras de PET virgen termoconformado, multifilamentos (PT-MF).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)

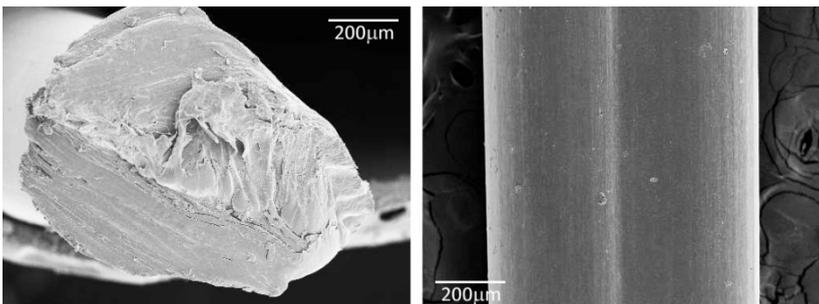


Esta textura se muestra estriada revelando los monofilamentos que las componen, los cuales, producto del corte, se separan en los extremos desdibujando su sección transversal originariamente circular.

Las producidas con residuos post-consumo reprocesado (P-MF), además de ser medio ambientalmente amigables, presentan más pronunciado el dibujo de las estrías, lo que hace suponer tendrá una mejor adherencia con la matriz.

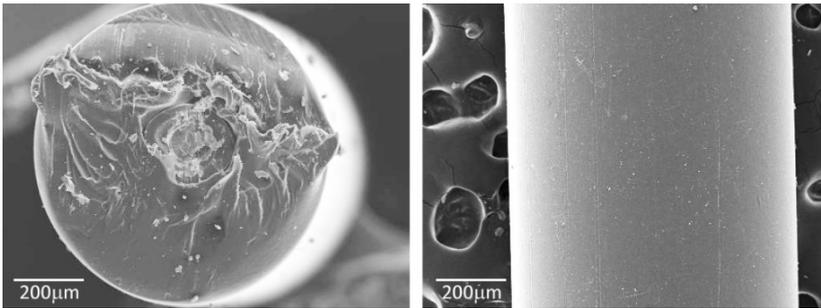
Sin embargo, las fibras elaboradas con los monofilamentos de polipropileno, también para escobas, PP-E (Figura 4.7), presentan una sección transversal maciza y una textura superficial longitudinal sin resaltos, a excepción de una hendidura central de poca profundidad.

Figura 4.7 - Fibras de PP de monofilamento producido para escobas (PP-E).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



Finalizando, en cuanto a las fibras producidas con los residuos del cableado de instalaciones de telecomunicación, se ha observado que la fibra óptica presenta una textura superficial lisa, lo cual hace suponer que, si de este único factor dependiera, su adherencia con la matriz no será suficiente (Figura 4.8).

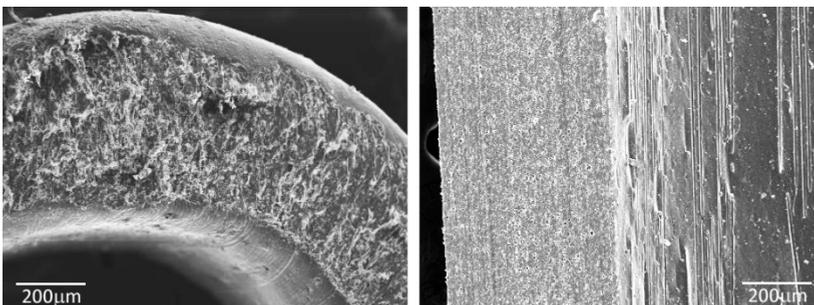
Figura 4.8 - Fibra óptica (FO).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



En su sección transversal se distingue claramente las zonas del núcleo síliceo y del recubrimiento de atenuación, pudiéndose apreciar la relación entre ambos materiales en la fibra óptica seleccionada. Cabe destacar que las dimensiones de ambas zonas dependen del tipo de fibra óptica, si es multi-modo o simple-modo así como de los fabricantes y materiales empleados para la atenuación.

Asimismo, las fibras producidas con la protección exterior de la fibra óptica (FP-FO) presenta micro poros en la sección transversal y longitudinal donde se han realizado los cortes, y pequeñas abrasiones en la superficie interior del tubo original (Figura 4.9)

Figura 4.9 – Funda de protección de fibra óptica (FP-FO).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



Estas abrasiones pueden haberse producido en el momento de la elaboración del cableado, al ensamblar los tres componentes, o en el proceso de separación de los mismos al estar la superficie en contacto con las fibras de kevlar (aramida) y deslizarlas sobre ella para su extracción.

Ambas hipótesis no se han podido comprobar al no contar con este material virgen, o que no hubiera estado en contacto con aramida.

#### 4.1.2 Caracterización mecánica de las fibras

La caracterización mecánica de las fibras se realizó a través del ensayo de tracción descrito en el punto 3.3.2.3.

Continuando con el criterio adoptado en la caracterización física, los distintos tipos de fibra óptica disponible se ensayaron físicamente para conocer el grado de diversidad existente.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 4.10 así como en la Figura 4.11 se muestran los módulos de elasticidad a tracción alcanzados.

Figura 4.10 - Resistencia a tracción de distintos tipos de fibra óptica (FO). Limite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) y tensión máxima alcanzada ( $\sigma_{t\text{máx}}$ )

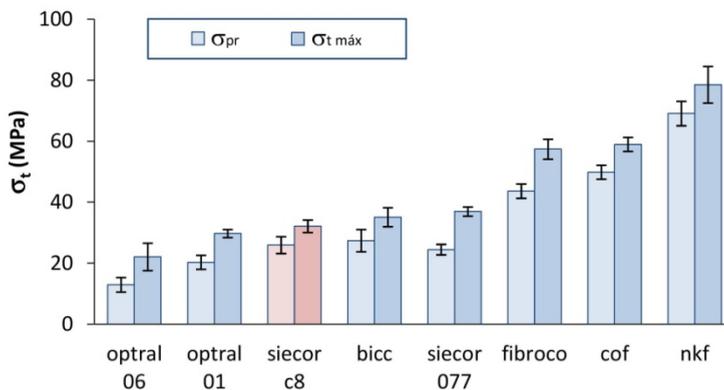
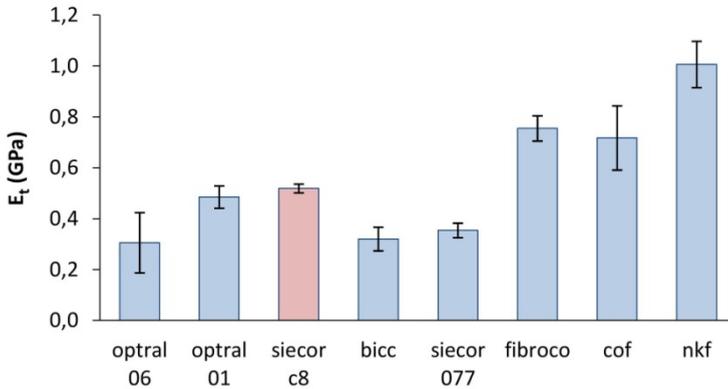
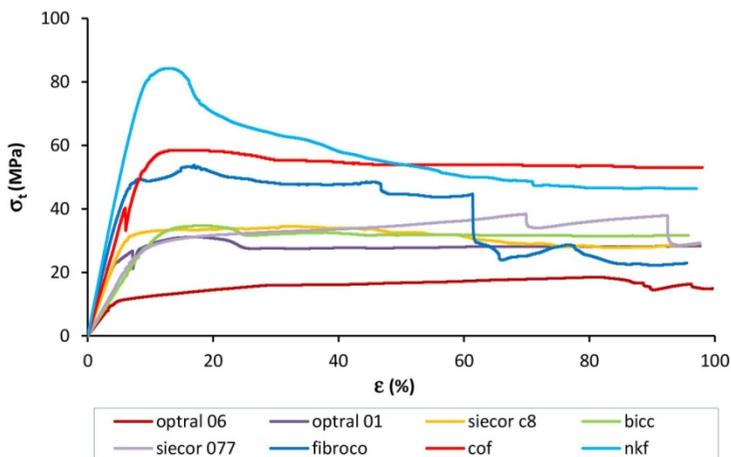


Figura 4.11 - Módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de distintos tipos de fibra óptica (FO)



En la Figura 4.12 se presenta la relación entre el esfuerzo de tracción ( $\sigma_t$ ) en MPa y la deformación relativa ( $\epsilon$ ) en %, donde se visualiza claramente que las diferencias no sólo corresponden a sus valores máximos sino también en cuanto a su comportamiento ante este esfuerzo.

Figura 4.12 - Relación tensión a tracción ( $\sigma_t$ ) / deformación ( $\epsilon$ ) en fibra óptica (FO) según marca.



Existen diferencias importantes en el límite del comportamiento lineal ( $\sigma_{pr}$ ) relacionadas con las deformaciones alcanzadas en el momento de la fractura del núcleo silíceo. Las

tensiones de este límite alcanzan valores entre 12,91 y 69,01 MPa, con deformaciones del 6% y 10% respectivamente.

Tras este límite el comportamiento de la capa exterior de la fibra óptica, mezcla de síliceo con materiales plásticos, continúa resistiendo los esfuerzos de tracción adquiriendo deformaciones relativas iguales o superiores al 100%.

Alcanzado  $\varepsilon = 100\%$  se detuvo el ensayo considerando que estas deformaciones son excesivas en el trabajo conjunto con la matriz cementicia cuyo valor en primera fisura se encuentra en el orden del  $\varepsilon = 0,02\%$  [3].

En esta zona de las curvas, después del límite de proporcionalidad, las fibras ópticas también presentan comportamientos diferentes. En la mayoría de ellas los valores de tensión se mantienen constantes o con pequeñas variaciones, sin embargo en las fibras marca Fibroco y Nkf se presenta una caída de la tensión, en forma abrupta ó gradual respectivamente.

Asimismo se ha realizado este procedimiento con la funda de protección de fibra óptica (FP-FO). Se ha evaluado la resistencia a tracción de cuatro de los tipos característicos observándose los resultados expresados en las Figuras 4.13 y 4.14.

Las curvas tensión/deformación presentadas en la Figura 4.15 muestran que estos materiales tienen un comportamiento elástico no lineal, obteniéndose deformaciones mayores al 100% sin alcanzar la rotura.

Figura 4.13 - Resistencia a tracción ( $\sigma_t$ ) de distintos tipos de fundas de protección de fibra óptica (FP-FO) al 100% de deformación.

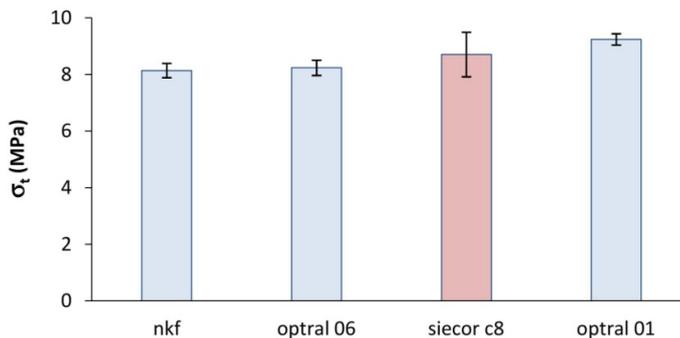


Figura 4.14 - Módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de distintos tipos de fundas de protección de fibra óptica (FP-FO)

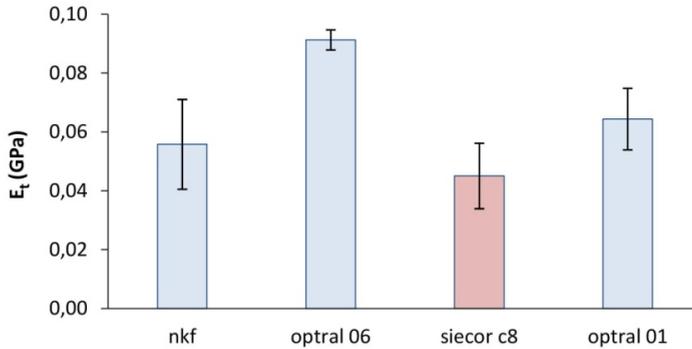
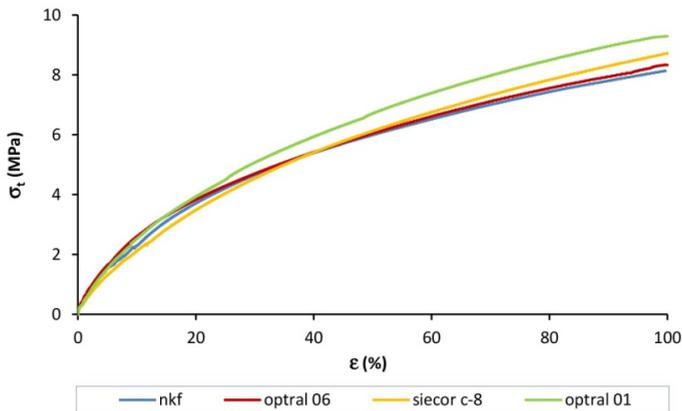


Figura 4.15 - Relación tensión a tracción ( $\sigma_t$ ) / deformación ( $\epsilon$ ) en funda de protección de fibra óptica (FP-FO) según marca.



Una vez finalizados los ensayos se pudo observar que estos materiales, dada su alta elasticidad, recuperan instantáneamente un 95% de su deformación y el 5% restante se recupera con el paso del tiempo no quedando como residual.

El mismo procedimiento se ha empleado para determinar la resistencia a tracción, límite elástico / límite de proporcionalidad y módulo elástico a tracción de cada uno de los materiales disponibles para la elaboración de fibras.

En la Tabla 4.7 y en las Figuras 4.16 a 4.18 se puede observar los valores medios obtenidos, para cada uno de los materiales, incluyendo la fibra óptica y protección de fibra óptica utilizadas.

Tabla 4.7 – Tensión máxima a tracción ( $\sigma_{t\text{máx}}$ ), límite de elasticidad ( $\sigma_{LE}$ )/límite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) y módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de las fibras analizadas.

	$\sigma_{t\text{máx}}$ (MPa)	$\sigma_{LE}$ ó $\sigma_{pr}$ (MPa)	$E_t$ (GPa)
<b>P-NC</b>	106,92	45,14	1,85
<b>P-C</b>	144,84	78,32	2,26
<b>P-MF</b>	26,80	17,61	0,80
<b>PV-MF</b>	162,06 <sup>(1)</sup>	80,23	3,97
<b>PT-MF</b>	163,51 <sup>(1)</sup>	61,48	3,62
<b>HDPE-L</b>	17,11 <sup>(1)</sup>	10,59	0,22
<b>PP-E</b>	194,24	54,40	1,01 <sup>(2)</sup>
<b>FO</b>	32,11 <sup>(1)</sup>	25,93	0,52
<b>FP-FO</b>	8,70 <sup>(1)</sup>	-----	0,05 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> al 100% de deformación no alcanzó la rotura

<sup>(2)</sup> módulo elástico determinado por la tangente

Figura 4.16 - Resistencia máxima a tracción ( $\sigma_{t\text{máx}}$ ) de las fibras analizadas.

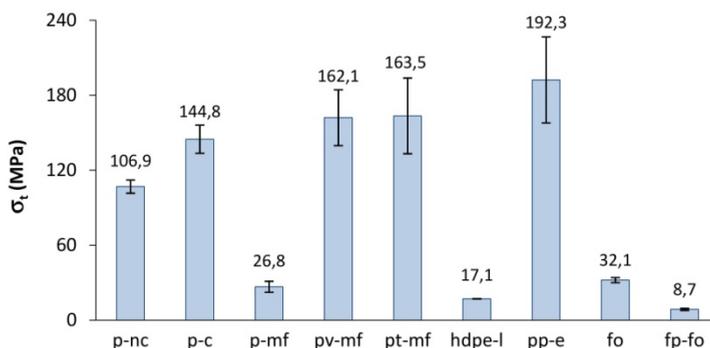


Figura 4.17 - Límite elástico ( $\sigma_{LE}$ ) / límite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) de las fibras analizadas.

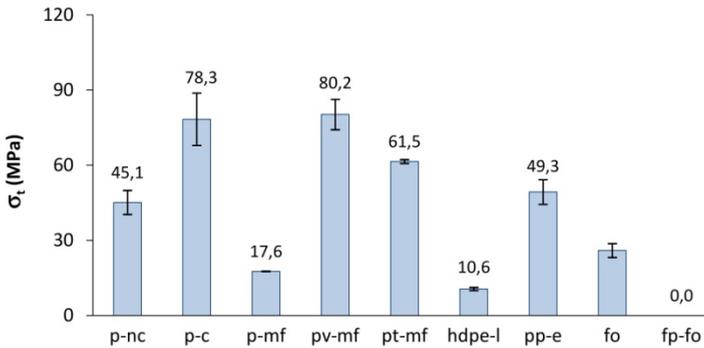
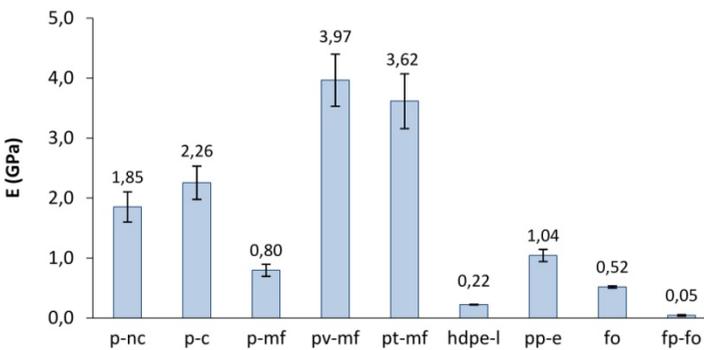


Figura 4.18 - Módulo de elasticidad (E) de las fibras analizadas



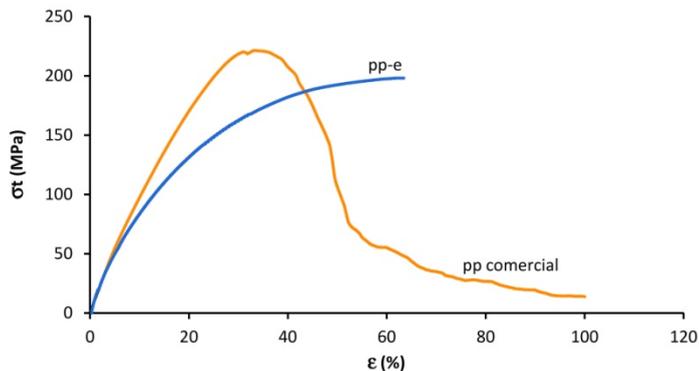
De los nueve tipos de fibras analizadas, las que presentan mayor resistencia a tracción son las PP-E, producidas por la empresa Sp-Berner con material virgen.

Si analizamos las curvas tensión/deformación de estas fibras con las que existen en el mercado, elaboradas con polipropileno para refuerzo de hormigones (con diámetro de sección promedio de 0,9 mm y 50 mm de longitud) (Figura 4.19) podemos apreciar que las mayores diferencias se presentan en su módulo elástico y en el tipo de rotura.

Para las fibras comerciales la rotura viene tras un período de estricción, donde la sección va disminuyendo hasta el punto de rotura. En las fibras PP-E, la rotura se produce frágilmente luego de alcanzar el valor máximo de tensión en la zona de deformación

plástica. Si bien ambas fibras tienen como material principal el polipropileno, éste no se encuentra en estado puro. Las fibras que se fabrican para refuerzo de hormigones suelen modificarse las propiedades para que tengan valores de deformación y resistencia acordes a las prestaciones que se espera de ellas. De igual manera ocurre con las fibras para escoba que requieren rigidez y resistencia para su uso en pavimentos exteriores.

Figura 4.19 - Diagrama tensión/deformación de fibras de polipropileno.  
(PP escobas y PP comercial)



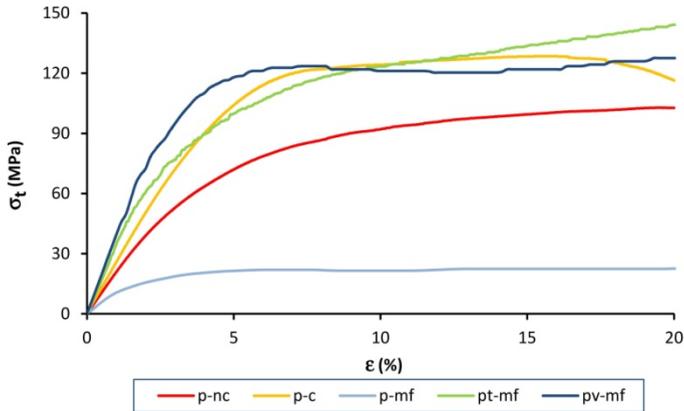
Dentro de las fibras de PET, las producidas con material virgen para la elaboración de escobas (PV-MF y PT-MF) presentan las mayores resistencias, así como los mayores módulos elásticos, seguidas por las producidas por corte de envases post-consumo (P-NC y P-C), si bien las deformaciones máximas alcanzadas las distinguen.

En la Figura 4.20 se muestran los diagramas tensión/deformación de estas fibras hasta una deformación del 20%, correspondiente a la alcanzada por las fibras P-C en rotura.

En ese orden de deformaciones las fibras multifilamento de material virgen resisten tensiones similares a las obtenidas del corte de los envases de bebidas gasificadas, presentando como diferencia un período plástico con tensiones crecientes que superan el 100% de deformación sin alcanzar la rotura.

Por considerar estos alargamientos excesivos para su trabajo en el material compuesto, en PV-MF y PT-MF, se finalizó el ensayo y midió la tensión máxima cuando su longitud alcanzó el doble del valor inicial ( $\epsilon = 100\%$ ).

Figura 4.20 - Diagrama tensión/deformación de fibras de PET



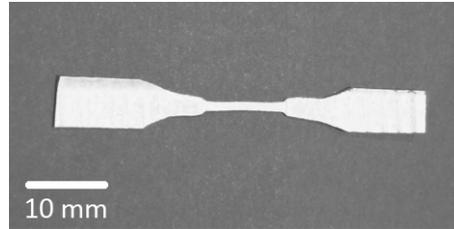
No obstante, las fibras multifilamentos elaboradas con PET reprocesado (P-MF) presentan una resistencia menor al 20% de las obtenidas en las otras fibras producidas con PET. Esta variación podría estar justificada por ser elaboradas con materiales que han sido expuestos a este procedimiento de reprocesado en más de dos oportunidades [4].

Asimismo, dentro de las fibras con módulos elásticos menores a 1 GPa, la fibra óptica (FO) presenta una resistencia a tracción un 20% mayor que las fibras de PET multifilamentos (P-MF) y su módulo elástico se corresponde al 65% del valor presentado por las mismas fibras.

Estas variaciones presentan su explicación en la composición de la fibra óptica; su núcleo fundamentalmente silíceo, admite mayores esfuerzos pero al trabajar conjuntamente con el recubrimiento, la sección es heterogénea y, junto al material utilizado para la atenuación, es más elástico que el PET.

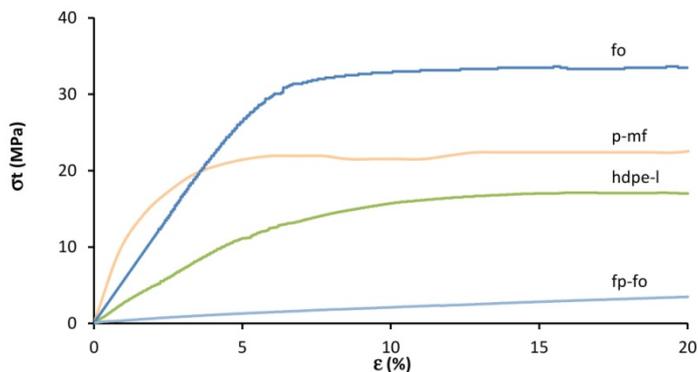
En todas ellas, una vez alcanzada la tensión del límite de proporcionalidad ( $\sigma_{LE}$  ó  $\sigma_{pr}$ ), presentan un estrangulamiento en la sección que se mantienen durante todo el intervalo plástico o no proporcional. El caso más notorio lo constituye la fibra de HDPE-L (Figura 4.21) donde el ancho de la sección disminuye aproximadamente un 50%, si bien, dada su elasticidad, no alcanza la ruptura hasta superado el doble de su longitud inicial.

Figura 4.21 - Fibra de HDPE-L después del ensayo de tracción hasta el 100% de alargamiento.



Analizando la curva tensión/deformación de estos materiales (Figura 4.22) se puede apreciar que, hasta el 20% de deformación relativa, no han alcanzado la rotura, y como se expuso anteriormente, la misma no es alcanzada ni al 100% de deformación.

Figura 4.22 - Diagrama tensión/deformación de las fibras con módulo elástico menor a 1 GPa. (P-MF, HDPE-L, FO y FP-FO)



En términos generales, se observa que en deformaciones similares a las de una posible matriz de cemento, todos los materiales se encuentran en la parte proporcional de la relación tensión/deformación, exceptuando la funda de protección de fibra óptica que, como se explicó anteriormente, tiene un desarrollo no proporcional desde el comienzo de aplicación de la carga.

### 4.1.3 Caracterización mecánica del material compuesto

En los estudios preliminares se ha realizado la caracterización mecánica del material compuesto sobre probetas prismáticas de  $25 \times 25 \times 140 \text{ mm}^3$  obtenidas con los moldes

indicados en el Capítulo 3, punto 3.2.9. Las mismas se realizaron con mortero plástico indicado en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [5] al que se le adicionó el 2% del volumen total en fibras según procedimiento descrito en el Capítulo 3, punto 3.3.5.

La longitud de fibra utilizada en estos primeros ensayos surge por asimilación a la menor longitud presente en fibras comerciales de polipropileno (6 mm), cumpliendo con la relación 3:1, longitud de fibra/tamaño del árido máximo empleado, planteada en el Anejo 14 de la Instrucción EHE 08 [6] para macro-fibras poliméricas.

En cuanto al porcentaje de fibra, se analizaron los utilizados en los trabajos de investigación existentes sobre el uso de fibras similares para fibro-refuerzo de morteros de cemento. Como se ha mencionado en el Capítulo 1, los porcentajes de fibras que se han utilizado en estos trabajos varían de 0,1% [7, 8] hasta 2% [9, 10], existiendo valores intermedios entorno al 1% [11, 12].

De este análisis se adoptó el valor mayor utilizado en la adición de fibras, 2%, que es un porcentaje que puede mejorar las condiciones de morteros y hormigones [13], y permite obtener resultados visibles sobre las prestaciones de cada tipo de fibra para su comparación.

En base a que las fibras provenientes de envases de bebidas carbonatadas son más resistentes y más rígidas que las de envases de bebidas no carbonatadas, para esta primera comparación con otros materiales se utilizaron muestras solamente de las segundas, P-NC.

Transcurridos 28 días de curado en cámara húmeda a  $20 \pm 1$  °C y una humedad relativa mayor o igual al 90%, se procedió a su ensayo a flexión y compresión, determinándose el módulo elástico para ambas sollicitaciones así como la tenacidad presentada en flexión, siguiendo los procedimientos indicados en el Capítulo 3, apartado 3.3.7. Los resultados obtenidos y discusión de los mismos se presentan a continuación clasificados por las características determinadas en cada uno de los procedimientos.

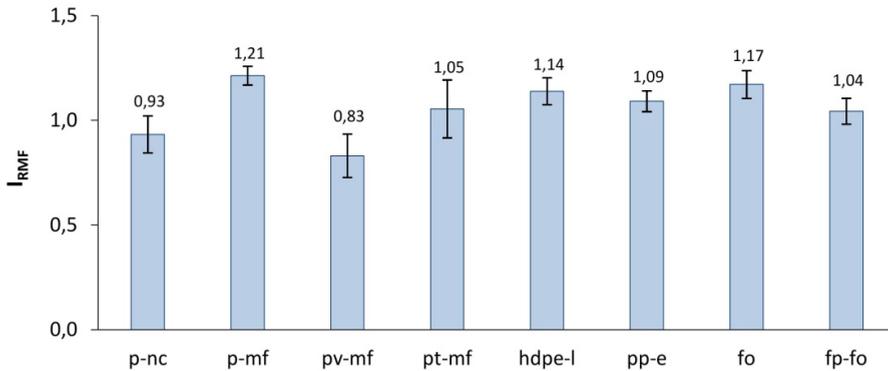
#### 4.1.3.1 Flexión

Para este ensayo, como se mencionó en el Capítulo 3, punto 3.3.7.1, las muestras se corresponden con cada una de las mitades que surgen del corte transversal de la

probeta original. El tamaño resultante de cada una de las muestras es de 25 x 25 x 140 mm<sup>3</sup> y se las ensayó a 3 puntos, según el procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [5] descrito en el punto 3.3.7.1.

En la Figura 4.23 se muestra el índice de resistencia mecánica a flexión ( $I_{RMF}$ ) de los morteros fibro-reforzados producidos, el cual se determinó en base a la relación entre la resistencia a flexión de los morteros fibroreforzados respecto a la del mortero control (mortero sin fibrorefuerzo).

Figura 4.23 – Índice de resistencia mecánica a flexión ( $I_{RMF}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.



Los resultados obtenidos muestran que, con esta proporción y tamaño de fibra, exceptuando cuando se emplearon las fibras P-NC y PV-MF, se han obtenido mejoras en la resistencia a flexión que van desde un 4 %, con el empleo de fibras provenientes de la funda de protección de fibra óptica (FP-FO), hasta un 21% con las fibras multifilamento producidas con residuos de envases post-consumo (P-MF). La menor resistencia a flexión obtenida cuando se utilizaron fibras, P-NC y PV-MF se puede entender que responde a una baja adherencia producida por su alta higroscopicidad. Las muestras elaboradas con estas fibras presentaron una consistencia más seca y luego de su ensayo las fibras en la sección de rotura se extraían sin ofrecer resistencia.

Observando el comportamiento de las fibras que provienen del corte de envases post-consumo, P-NC, se aprecia una disminución del 7% que no mantiene relación con el incremento del 14% obtenido con fibras provenientes de envases post-consumo de

bebidas lácteas (HDPE-L), las cuales, como se ha visto en el punto 4.1.2 tienen el módulo elástico y resistencia mecánica a tracción menor, siendo un 12% y 16% respectivamente.

Comparando los resultados obtenidos en los tres tipos de fibras multifilamento se observa que las fibras obtenidas por el reprocesado de PET consiguen los mejores resultados lo cual encuentra su explicación en las diferencias de superficie que presentan.

Como se mencionó en el punto 4.1.2., las fibras P-MF presentan una textura superficial más irregular que mejora su adherencia a la matriz, obteniéndose mejores resultados pese a tener menor resistencia a tracción que las otras dos (16%). Asimismo, si relacionamos los valores obtenidos con fibras P-NC con los de las fibras FP-FO vemos que no existe una explicación dado que estas últimas se utilizaron con sección entera presentando una esbeltez de un valor muy alejado al recomendado.

Analizando la dispersión obtenida en los resultados, se aprecia que el mayor valor, 16,64%, se produce con el empleo de las fibras multifilamento producidas con PET virgen (PV-MF) siendo en todos los demás casos menores al 10%.

En términos generales se observó que los morteros fibro-reforzados que han presentado menores, o nulas, ganancias en la resistencia a flexión se corresponden con las fibras que, luego del ensayo, se extrajeron sin mayor esfuerzo de la sección de rotura mostrando niveles de adherencia bajos, o que presentaron un número menor de las mismas en la sección.

En la Figura 4.24 (a) se muestra la sección de rotura de las muestras con P-NC, con un bajo número de fibras en la misma y un desprendimiento total permitiendo la separación de ambas partes, en contraposición con lo exhibido en las muestras con fibras P-MF (Figura 4.24 (b)).

Las muestras fibro-reforzadas con FP-FO, al realizarse con la sección entera, presentaron la concentración del material de refuerzo en un número limitado de puntos (Figura 4.25 (a)) y se pudo visualizar que la matriz no había penetrado totalmente en el hueco central de los cilindros por lo que se prepararon nuevas muestras empleando como sección de fibra la cuarta parte de la sección de los tubos (Figura 4.25 (b)).

Figura 4.24 - Secciones de rotura a flexión de muestras fibro-reforzadas con (a) P-NC y (b) P-MF.

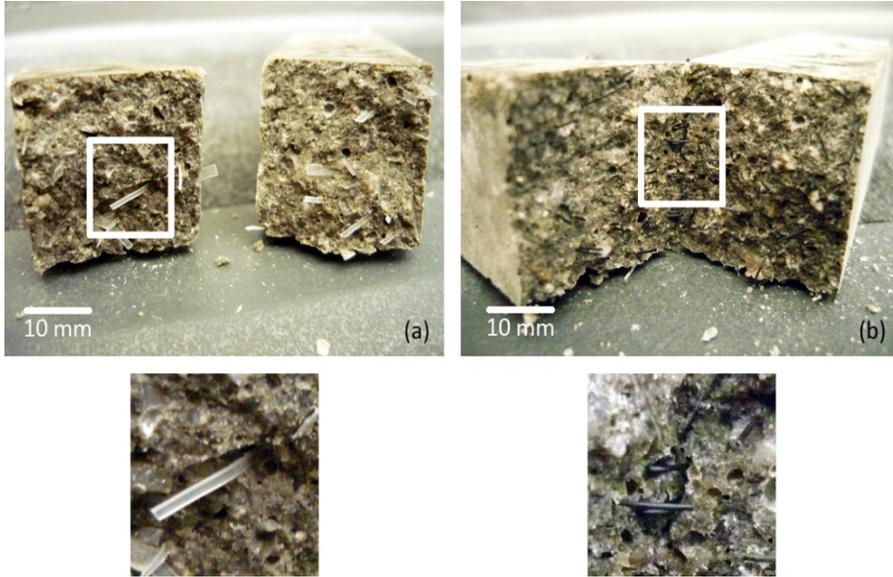
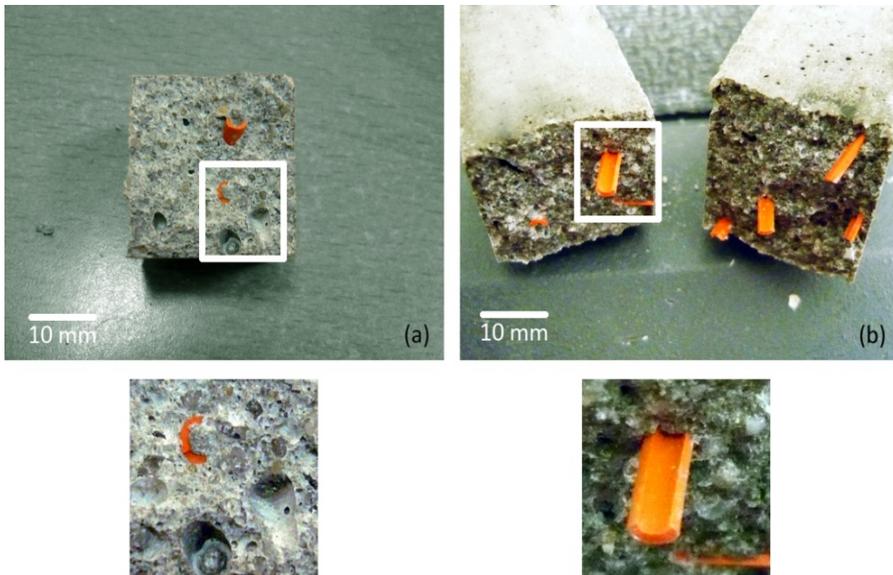


Figura 4.25 - Secciones de rotura a flexión de muestras fibro-reforzadas con FP-FO. (a) sección original (b) sección cortada en 4 partes.



La ganancia obtenida en la resistencia a flexión se mantuvo en un 4% lográndose una mejor distribución de tensiones dentro de la sección producto de la presencia de 4 veces más fibras en la misma. Los huecos observados en la parte inferior de la sección con fibras enteras, Figura 4.25 (a), se corresponden con las fibras que se extrajeron de forma manual sin presentar mayor resistencia dada su casi nula adherencia y la falta de matriz dentro de la sección de las mismas.

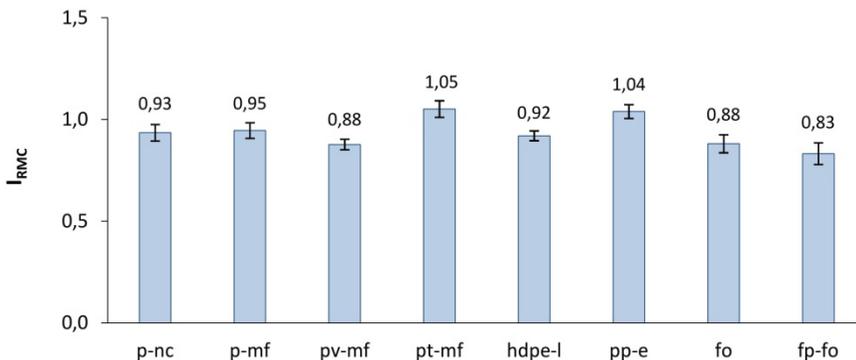
#### 4.1.3.2 Compresión

A cada una de las mitades de las probetas ensayadas a flexión se les determinó la resistencia a compresión según el procedimiento indicado en la Norma UNE-EN 196-1:2005 [5] mencionada en el punto 4.1.3.1.

Las secciones ensayadas corresponden al ancho de la probeta y una longitud de 40 mm correspondiente a la dimensión del dado de carga del templete utilizado para la aplicación de la misma, según procedimiento indicado en el punto 3.3.7.2.

En la Figura 4.26 se representa el índice de resistencia mecánica a compresión ( $I_{RMC}$ ) de los morteros producidos, el cual se determinó en base a la relación entre la resistencia a compresión de los morteros fibroreforzados respecto a la del mortero control (mortero sin fibrorefuerzo).

Figura 4.26 - Índice de resistencia mecánica a compresión ( $I_{RMC}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.



En términos generales, se observa que las resistencias a compresión, con el porcentaje de adición y dimensión de fibras empleadas, no ha tenido pérdidas de gran magnitud e incluso ha sido superior a la muestra control con el empleo de las fibras PT-MF y PP-E.

Las mayores pérdidas (17%) se pueden observar en las muestras con fibras FP-FO lo cual es un resultado esperado dada la falta de matriz en su interior, según lo mencionado en el punto anterior, lo que genera huecos, con la consiguiente disminución de resistencia.

La dispersión presentada en todas las muestras ha sido menor a un 5% lo que, además de obtener datos confiables, nos permite afirmar que la dispersión de las fibras en la matriz se ha realizado con suficiente homogeneidad, no creándose oquedades producto de la concentración de las mismas.

#### 4.1.3.3 Módulos elásticos

En base a las curvas carga/deformación obtenidas en los ensayos de flexión y compresión se han determinado los módulos elásticos a flexión y compresión respectivamente.

Por ser el mortero fibro-reforzado un material anisótropo y heterogéneo [14], condicionado a la orientación de las fibras, el módulo elástico a compresión no se debería corresponder con el módulo elástico a tracción.

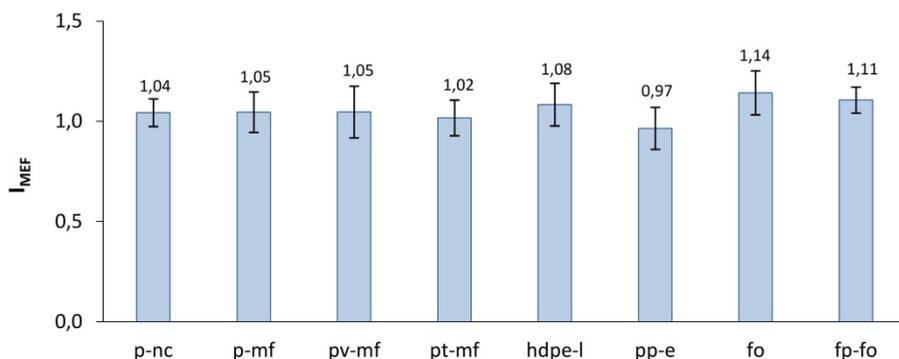
Por este motivo, los valores aquí obtenidos no se pueden comparar con el valor de módulo de Young (E) que figure en documentos bibliográficos, si se desea realizar su comparación debe hacerse con los módulos elásticos correspondientes a iguales sollicitaciones.

En la Figura 4.27 se representa el índice de módulo elástico a flexión ( $I_{MEF}$ ) de los morteros producidos, el cual se determinó en base a la relación entre el módulo elástico a flexión de los morteros fibroreforzados respecto al módulo del mortero control (mortero sin fibrorefuerzo).

En general, exceptuando el fibro-refuerzo con las fibras PP-E, se observa que el módulo de elasticidad a flexión ha tenido un incremento entre 2% y 14% relacionado con el trabajo conjunto matriz/fibra y la transferencia de tensiones que se producen entre ellas

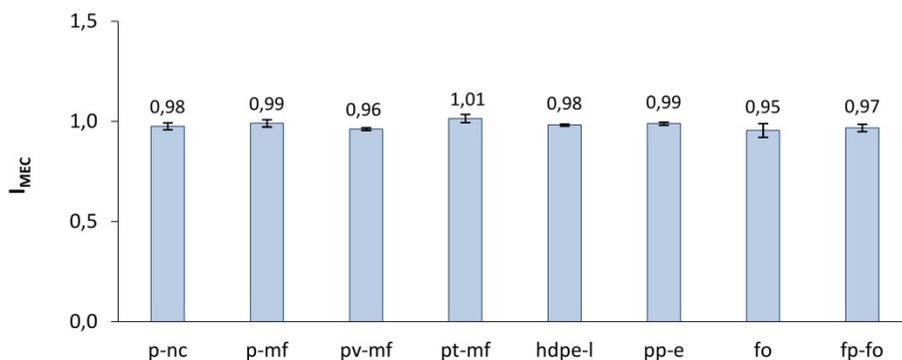
a través de la zona interfacial, permitiendo resistir algo más de tensiones ante iguales valores de deformación.

Figura 4.27 - Índice de módulo elástico a flexión ( $I_{MEF}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.



Asimismo, en la Figura 4.28 se representa el índice de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) de los morteros producidos, el cual se determinó en base a la relación entre el módulo elástico a compresión de los morteros fibro-reforzados respecto al módulo del mortero control (mortero sin fibro-refuerzo).

Figura 4.28 - Índice de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.



En general, los valores de módulo elástico a compresión han sido iguales o menores a la muestra control ( $I_{MEC} \leq 1$ ), pero con diferencias no mayores a 5% lo cual indica que, con

el tamaño y proporción de fibra utilizado, el incremento de elasticidad obtenido es mínimo.

En ambos casos, dado que la determinación de los módulos es muy sensible al tamaño de la probeta ensayada, estos valores sólo nos sirven de primera referencia, siendo más importante las conclusiones que se puedan extraer en la determinación de energía absorbida por el trabajo de flexión.

#### 4.1.3.4 Tenacidad

En la determinación de la tenacidad, o energía necesaria para la deformación de la probeta ante un esfuerzo de flexión, se han utilizado los resultados obtenidos en el punto 4.1.3.1.

Según los procedimientos indicados en la Norma UNE 83510:2004 [15] y ASTM C1018:97 [16] la obtención de los índices normalizados corresponden a valores de deformación que no se han podido alcanzar con esta proporción y dimensión de fibras. Las roturas a flexión han tenido, en la mayoría de los casos, un pequeño aporte del fibrorefuerzo sin llegar a constituirse en significativo (Figura 4.29)

Exceptuando las muestras fibro-reforzadas con PV-MF y PT-MF, las curvas muestran que, tras la rotura de la matriz, las fibras continúan resistiendo entre un 12% y un 20% de la resistencia máxima alcanzada. Para las muestras reforzadas con fibras procedentes de envases post-consumo de bebidas no carbonatadas, P-NC, se alcanzan valores de deformaciones suficientes para determinar los índices de tenacidad  $I_5$  e  $I_{10}$ , 1,74 y 2,47, que constituyen el 35% y 25% respectivamente de los valores del comportamiento de un material elasto-plástico ideal que sirve de referencia para estos índices.

Por este motivo, el único parámetro comparable que se puede extraer de los resultados obtenidos, es la cantidad de energía que se requiere para producir la primera fisura (energía en período elástico  $E_{PE}$ ).

En la Figura 4.30 se representa el índice de energía en período elástico ( $I_{EPE}$ ) de los morteros producidos, el cual se determinó en base a la relación entre la energía necesaria para producir la primera fisura en los morteros fibro-reforzados respecto a la energía necesaria para el mortero control (mortero sin fibrorefuerzo).

Figura 4.29 - Diagramas carga/deformación en flexión de morteros fibro-reforzados.

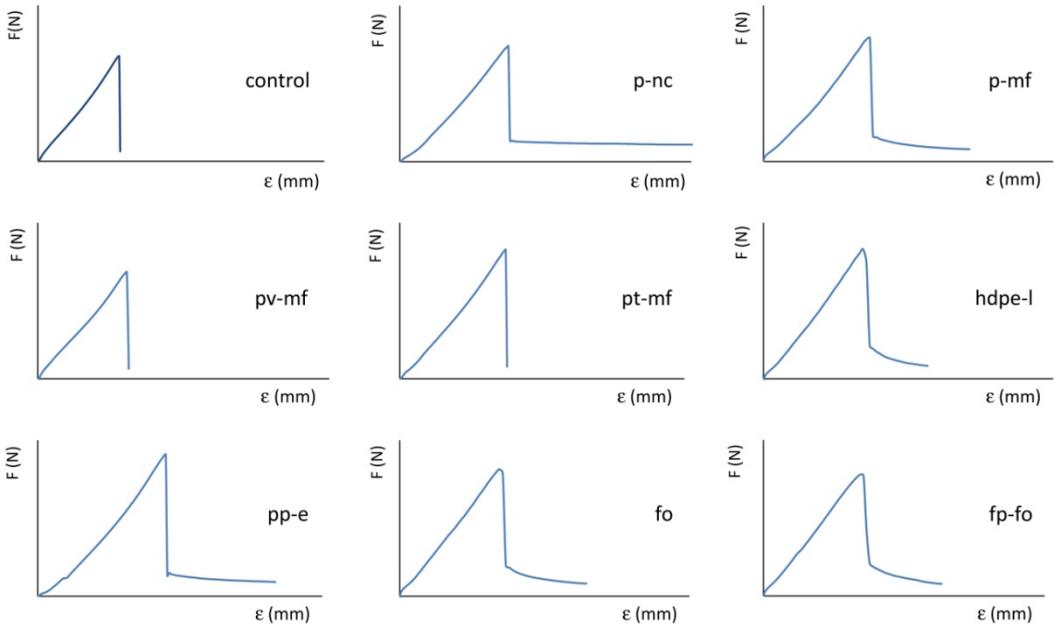
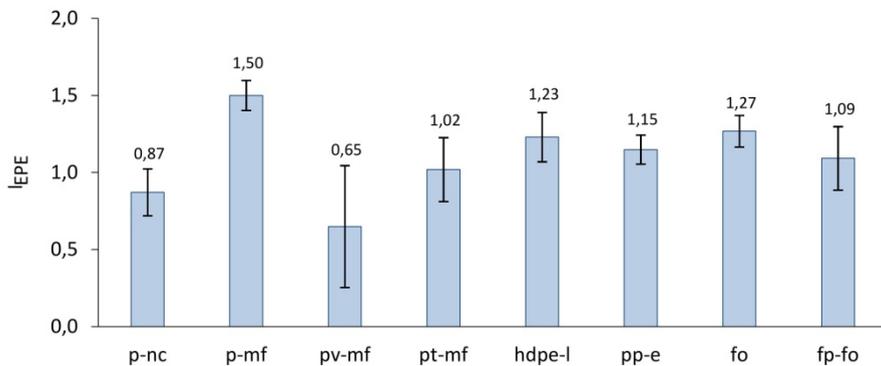


Figura 4.30 – Índice de energía en período elástico ( $I_{EPE}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.



Estos resultados nos muestran que, exceptuando las muestras fibro-reforzadas con P-NC y PV-MF, con la adición del 2% de estas fibras se requiere mayor energía para flexar la probeta hasta producir la primera fisura. La excepción con estas dos fibras, P-NC y PV-

MF se puede entender, al igual que con los resultados de resistencia a flexión, que responde a una baja adherencia producida por su alta higroscopicidad.

La dispersión de los resultados es alta, con valores que superan el 10%, alcanzando 32% en las muestras con fibras PV-MF. De todas formas, en el 50% de los casos, si tomamos como valor de energía el mínimo que se obtuvo en la serie, se supera el índice 1 correspondiente a la muestra control.

#### 4.1.4 Degradación de fibras

Los primeros estudios de degradación de las fibras seleccionadas se realizaron con el objetivo de identificar la existencia o no de agresión a las mismas cuando se emplean como refuerzo en matrices cementicias. Se analizaron visualmente, a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), después de su exposición a distintos medios alcalinos entre los cuales se encuentra la propia matriz cementicia.

Se entiende necesario realizar este estudio porque, si se identificara la existencia de una degradación, de naturaleza física o química, podría llegar a cuestionarse su empleo como fibro-refuerzo en forma directa y requerir un estudio detallado de técnicas para proteger las fibras o disminuir la agresión del medio hasta que resulte viable, tanto desde el punto de vista técnico como socio-económico.

Como se mencionó en el Capítulo 1, punto 1.4.2.2., existen antecedentes sobre esta temática en fibras de PET, fundamentalmente exponiéndolas a soluciones alcalinas, llegando a conclusiones a veces contradictorias entre sí. La degradación total en ciertos sectores de las fibras, expresada por el equipo de D.A. Silva y colaboradores [17], al observarlas luego de su exposición a una solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se contraponen a la del equipo de T. Ochi y colaboradores [18] que afirman que son lo suficiente alcali resistentes luego de exponerlas durante 120 hs en una solución de hidróxido de sodio a  $60 \pm 2$  °C.

Asimismo, de los demás materiales utilizados en este trabajo no se han encontrado referencias a estudios de durabilidad en matrices cementicias por lo que su análisis se entiende prioritario.

Según lo observado en las caracterizaciones previas, las fibras conformadas por multifilamentos producidas para la elaboración de escobas presentan diferencias considerables entre ellas. PV-MF y PT-MF, si bien son las más resistentes a tracción, presentan un desempeño inferior a las fibras P-MF cuando se usan para los materiales compuestos de matriz cementicia.

Este es el motivo por el que se opta continuar el estudio solamente con las fibras elaboradas con PET proveniente de envases post-consumo (P-MF) entendiéndose que, a pesar de ser realizadas por reprocesado del residuo, presentan un aporte al destino final de los mismos.

#### 4.1.4.1 Inmersión en medio alcalino

Como se indicó en el Capítulo 3, para producir un medio altamente alcalino se utilizó una solución uno molar de hidróxido de sodio (1 M NaOH) con un pH = 14, en la cual se expusieron las fibras mediante inmersión a temperatura de Laboratorio ( $20 \pm 1$  °C).

Finalizado el período de 15 días, según procedimiento descrito en el punto 3.3.3.1., se extrajeron 5 fibras de cada tipo, se lavaron con suficiente agua destilada y se secaron para visualizarlas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

Asimismo, mediante SEM, se obtuvieron imágenes de las fibras originales sin tratar, las cuales actúan de patrón de comparación para poder determinar si la solución alcalina ha degradado superficialmente a las fibras

En las Figuras 4.31 a 4.36 se exponen las imágenes obtenidas para cada una de las fibras que permiten su visualización así como la comparación entre ellas.

Analizando el aspecto de las micrografías obtenidas se puede apreciar que, en general, existe una degradación de las fibras al someterlas a esta solución.

Por la alta alcalinidad de la solución empleada, esta apreciación resulta congruente con las afirmaciones planteadas por J.P. Won y colaboradores [19], en cuanto a una degradación progresiva de las fibras expuestas a la misma.

Figura 4.31 – Fibra de P-NC tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

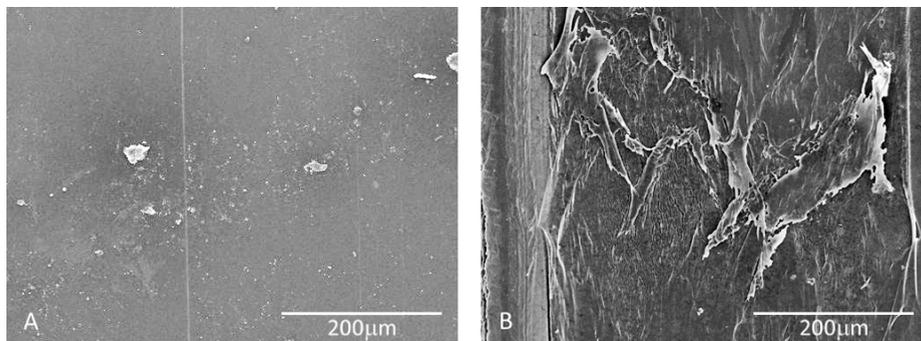


Figura 4.32 – Fibra de P-C tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

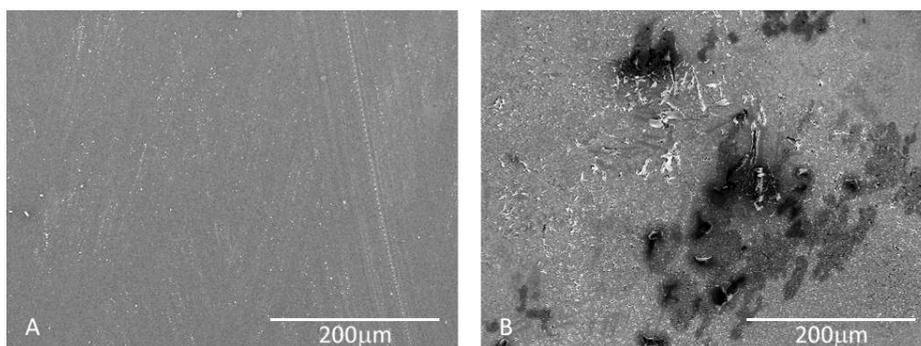


Figura 4.33 – Fibra de P-MF tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

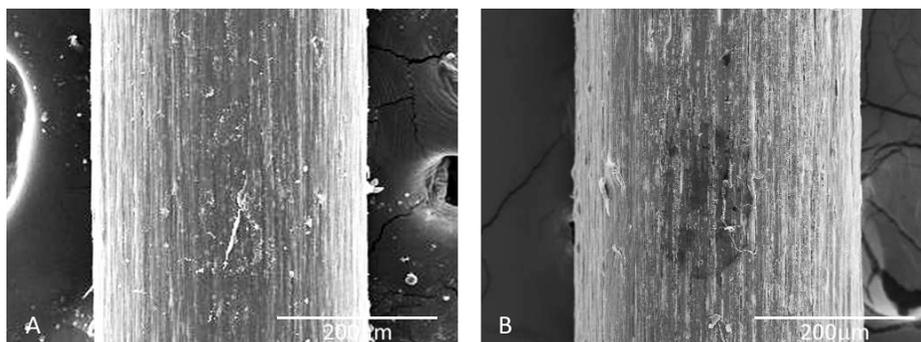


Figura 4.34 – Fibra de HDPE-L tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

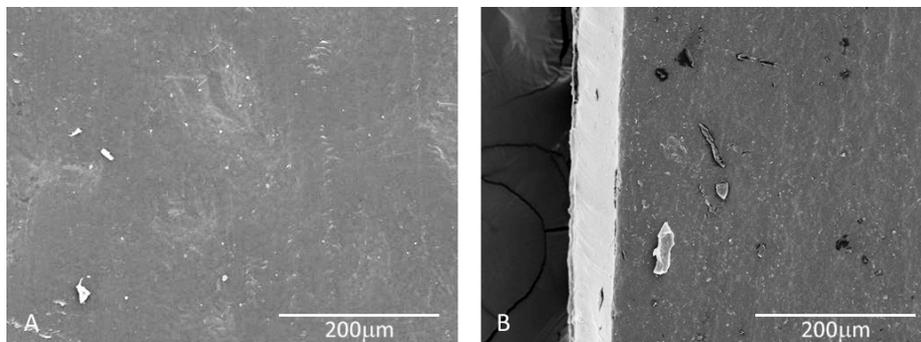


Figura 4.35 – Fibra de FO tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

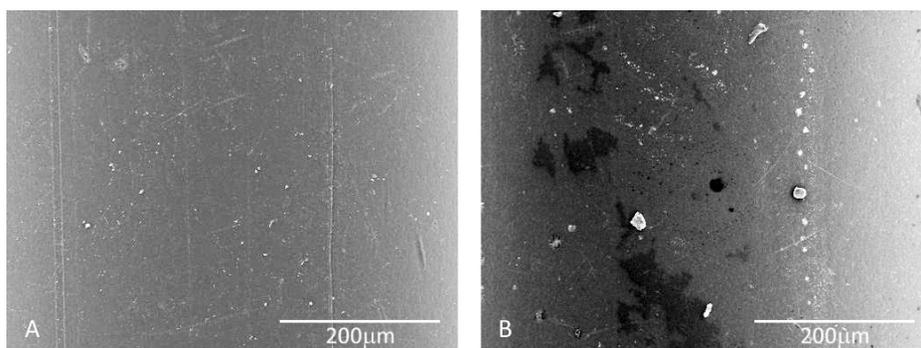
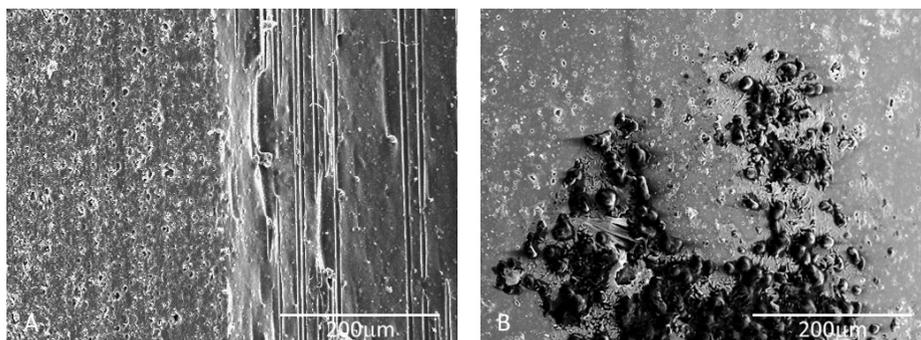


Figura 4.36 – Fibra de FP-FO tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina



Se puede apreciar también que la magnitud de degradación no es igual en todos los tipos. Las fibras más afectadas son las de PET de envase post-consumo de bebida no carbonatada (P-NC) en las que se observa un descamado superficial (Figura 4.31), seguidas por las de Funda Protectora de Fibra Óptica (FP-FO) (Figura 4.36), las de PET de envases post-consumo de bebidas carbonatadas (Figura 4.32) y PET multifilamento (P-MF) (Figura 4.33).

Por el contrario, las fibras de polietileno de alta densidad (HDPE-L) y las de fibra óptica (FO) muestran una variación superficial mínima que llevan a concluir que no se han visto afectadas o ha sido de escasa magnitud.

#### 4.1.4.2 Inmersión en pasta cementicia con envejecimiento controlado

Según los resultados obtenidos en el punto anterior, con la inmersión en solución alcalina, dado que la matriz cementicia es químicamente más compleja que una disolución de hidróxido sódico, se considera conveniente realizar una prueba de iguales características pero introduciendo las fibras en pasta de cemento. En este caso, no solamente se evaluaría el efecto de la alcalinidad del medio, sino también el hecho de que se produzcan nuevos productos (generados en la hidratación del cemento) justo en la zona superficial de la fibra, los cuales pueden producir efectos de tipo mecánico.

La pasta, elaborada con Cemento Pórtland Tipo CEM I-52,5R, según procedimiento indicado en el punto 3.3.3.2., relación agua/cemento= 0,5, es igual a la empleada en la matriz de los morteros que han sido ensayados a flexión y compresión.

A los efectos de 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  $\geq 90\%$ ) estas pastas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento controlado, sumergiendo los botes que contenían las muestras en agua a una temperatura de  $60 \pm 2$  °C durante un período de 15 días.

Al no haberse encontrado investigaciones sobre procesos de envejecimiento acelerado de matrices cementicias reforzadas con fibras poliméricas, se adopta esta medida sobre la base del conocido efecto de la temperatura sobre la aceleración de las reacciones químicas que se producen en la hidratación del cemento [20] y entendiendo que, si los

productos que se forman en ella afectan a las fibras, se puede visualizar su efecto en menor tiempo.

Por otra parte, este proceso en un mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio, si bien no existe coincidencia entre los distintos autores, se establece como mínimo una correspondencia aproximada de 1 día a 60 °C  $\approx$  100 días de curado a 20 °C [21-23] por lo cual en el período de 15 días equivaldría a 4 años, aproximadamente.

Si bien estos estudios son aplicables al GRC (glass fiber reinforced cement) [24] y no son linealmente extrapolables a este trabajo servirían de referencia para la metodología a adoptar.

De la totalidad de fibras extraídas, el 50% de cada tipo fueron lavadas y secadas según procedimiento indicado en el Capítulo 3, desprendiendo la matriz cementante con ácido clorhídrico diluido. Luego se han visualizado mediante microscopía óptica (Lupa Binocular) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

En las Figuras 4.37 a 4.42 se exponen las imágenes obtenidas para cada una de las fibras.

En general, las fibras introducidas en la pasta cementicia, y que fueron sometidas al proceso de envejecimiento controlado, han mostrado una degradación mayor que las analizadas en el punto 4.1.4.1., inmersas en la solución alcalina de NaOH.

Figura 4.37 – Fibras de P-NC en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

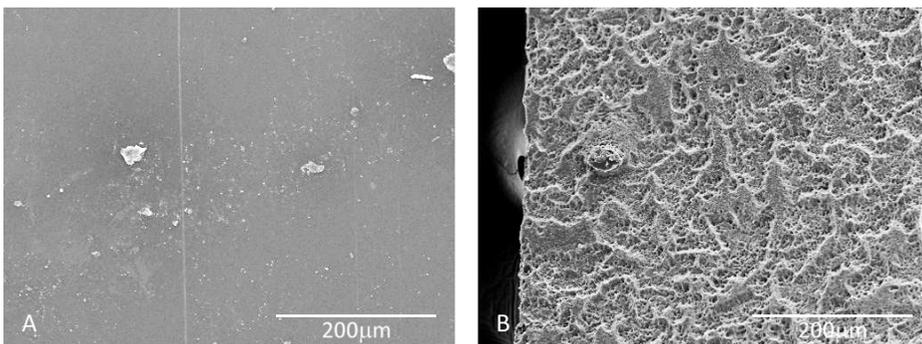


Figura 4.38 – Fibra de P-C en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

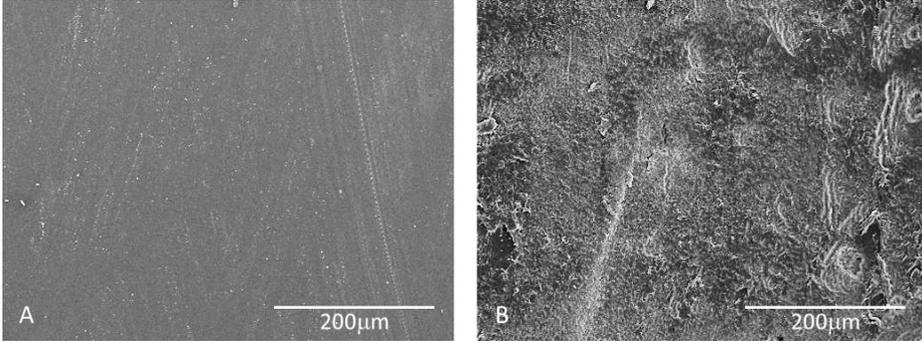


Figura 4.39 – Fibra de P-MF en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

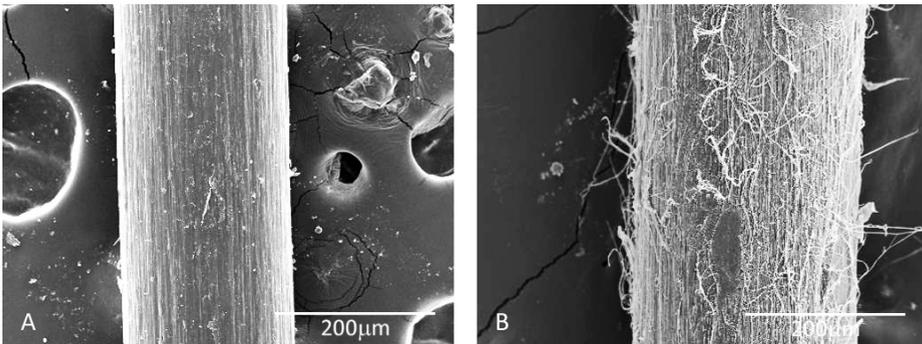


Figura 4.40 – Fibra de HDPE-L en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

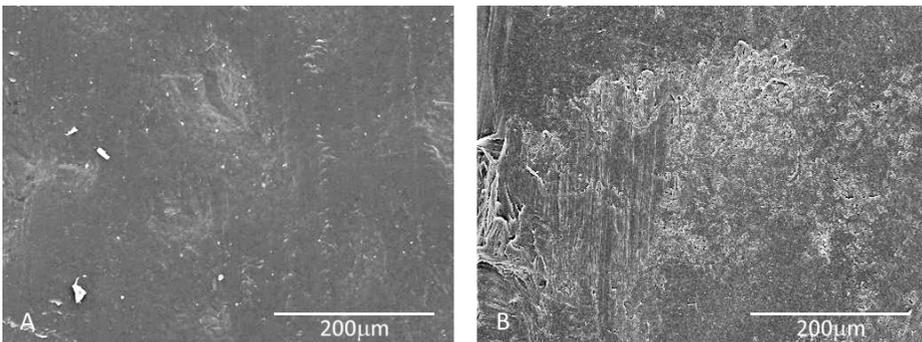


Figura 4.41 –Fibra de FO en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

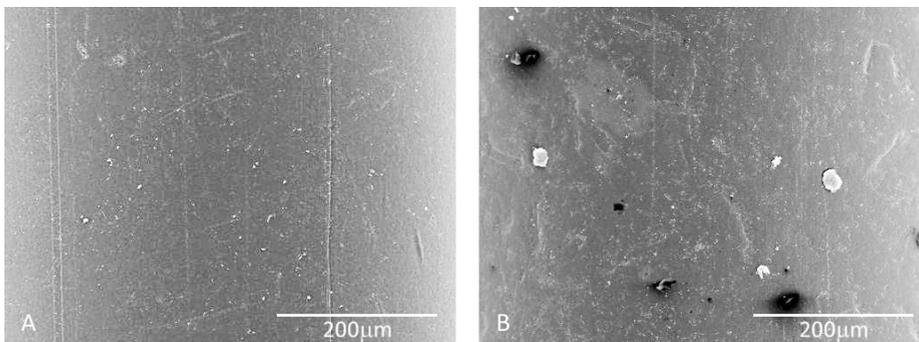
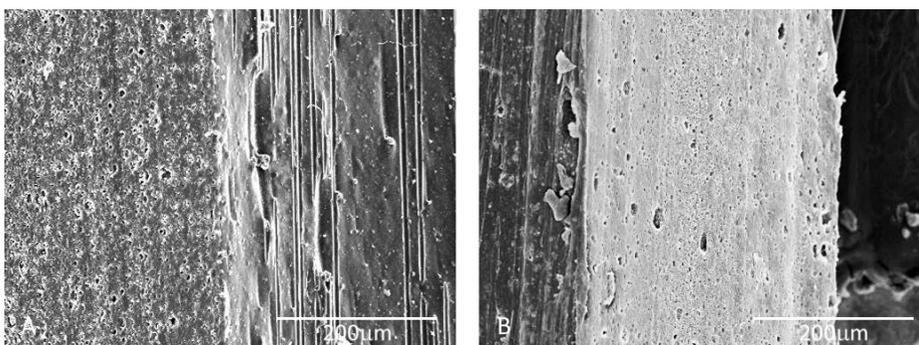


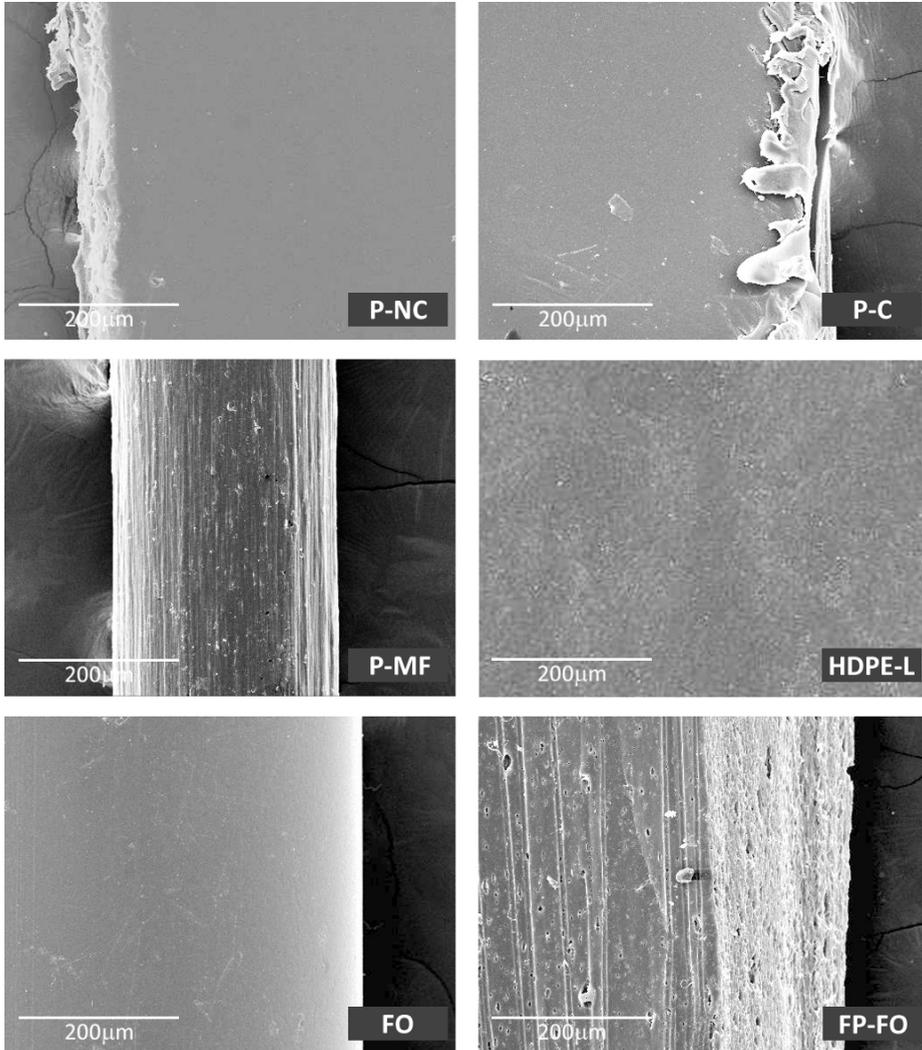
Figura 4.42 – Fibra de FP-FO en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia



De los seis tipos de fibra, las que se observan más degradadas son las de PET y las HDPE, siendo el orden de mayor a menor degradación: P-NC > P-MF > P-C > HDPE-L. En las fibras provenientes del residuo del cableado de Fibra Óptica, la FP-FO muestra pequeños signos de degradación, en forma de poros, siendo prácticamente inexistente la degradación en la fibra FO.

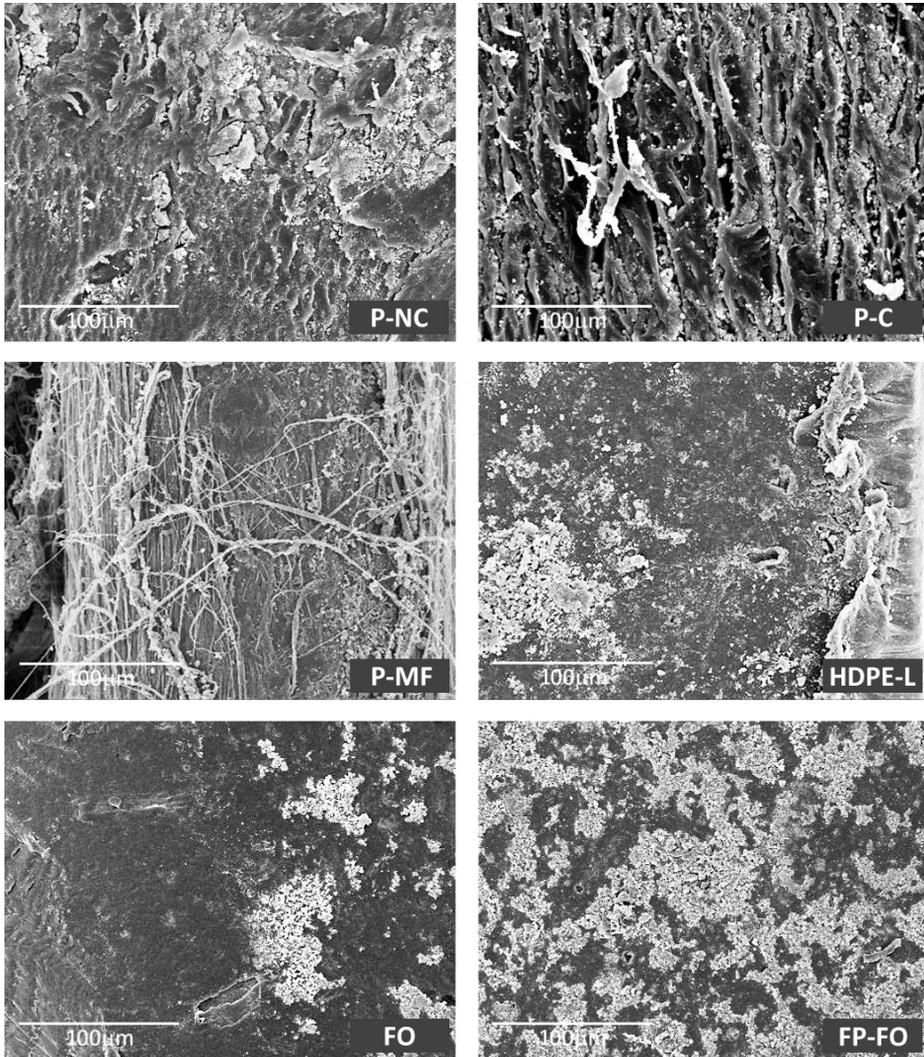
Para descartar el ataque de las fibras por parte de la disolución ácida, utilizada para el lavado, se realizaron micrografías a fibras originales embebidas en igual disolución de HCl diluido (Figura 4.43), comprobando que no se vio alterado su estado original.

Figura 4.43 - Fibras vírgenes lavadas con disolución de ácido clorhídrico diluido.



Al 50% restante de las fibras extraídas de la pasta de cemento, no se le aplicó ninguna técnica de lavado, permaneciendo residuos de pasta adheridos a la superficie. Mediante SEM se visualizó, a mayor número de aumentos, la incidencia de estos restos en la degradación (Figura 4.44).

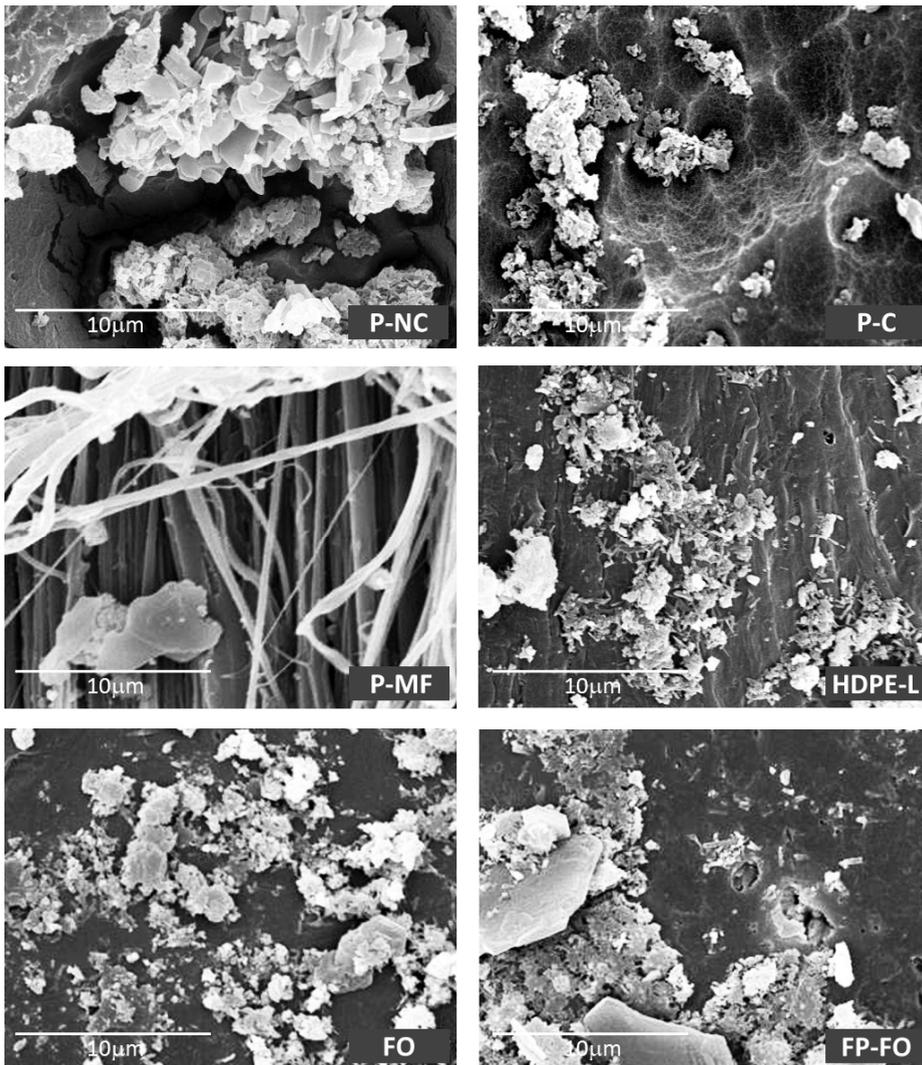
Figura 4.44 - Fibras en pasta cementicia con curado en baño 60 °C, sin lavar.



Se puede apreciar que la cantidad de restos de matriz cementicia se relaciona bastante bien con la degradación que se observa en las fibras. En las fibras de PET procedentes de envases post-consumo (P-NC y P-C) se visualiza mayor cantidad de material ubicado entre los relieves del material degradado. Sin embargo, en la fibra óptica (FO) los residuos de matriz son casi inexistentes.

Visualizando a 5000 aumentos las zonas con restos de pasta (Figura 4.45), se puede observar que en las fibras P-NC y P-C la formación de cristales se da en el interior de las oquedades producidas. Por la forma amorfa de muchos de estos productos, podríamos asociarlos a silicatos cálcicos hidratados.

Figura 4.45 – Residuos de pasta cementicia en fibras, curado en baño 60 °C.



En contraposición, en las fibras HDPE-L, FO y FP-FO los cristales se forman en la superficie, apareciendo, en la última, cristales de morfología hexagonal que son asociados a la presencia de portlandita, aunque son excepcionalmente delgados, por lo que podrían también ser asociados a fases hidratadas de aluminatos cálcicos.

En las fibras P-MF entre los filamentos que la constituyen y se observa la desfibrilación sufrida.

Asimismo, a través de la lupa binocular se observaron fibras enteras, parte inmersa en la pasta y la parte fuera de ella, a los efectos de verificar que la temperatura de 60 °C no es un factor añadido en el proceso de degradación (Figura 4.46).

En general, en las fibras que no fueron lavadas con la disolución de ácido clorhídrico diluido, se puede observar que los restos de pasta están depositados dentro de las oquedades que se han producido como consecuencia de la degradación, pudiéndose entender que dicho proceso se ha realizado con la formación de productos de reacción en la etapa de hidratación del cemento, generando espacios donde se acumulan los mismos.

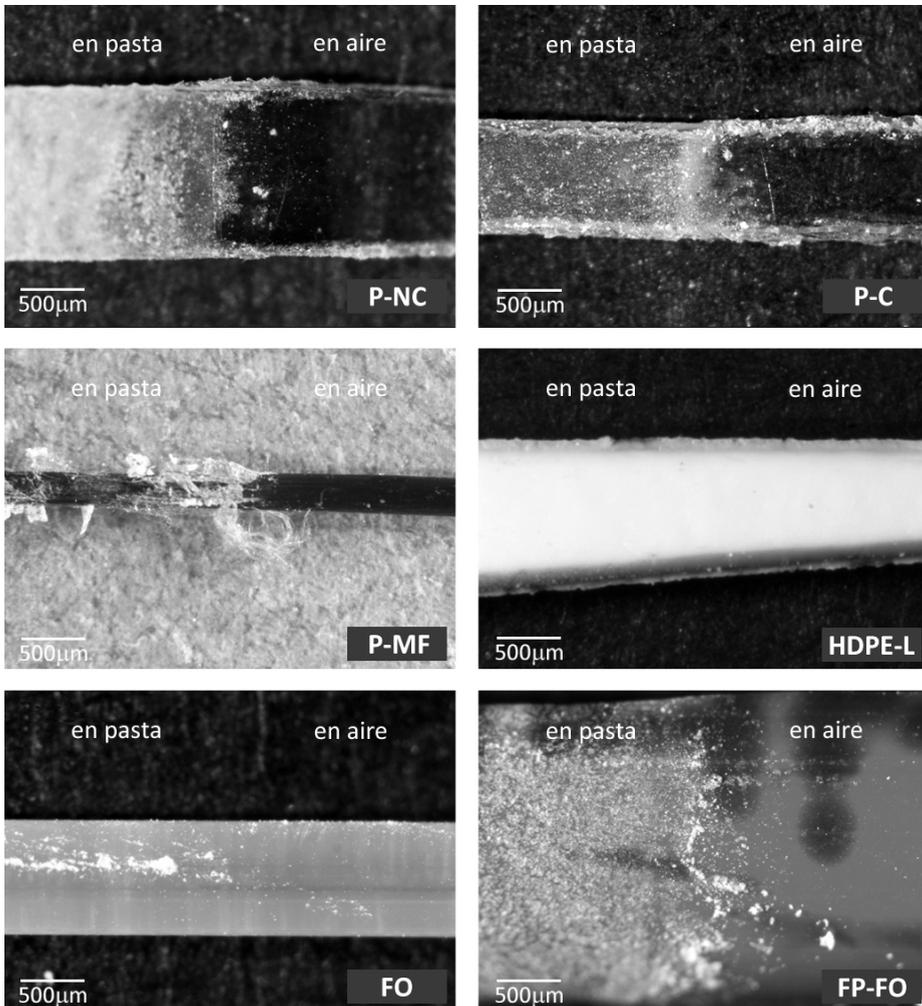
La cantidad de pasta adherida a cada fibra confirma las conclusiones de agresión superficial. La mayor degradación en la superficie de las fibras, coincide con una mayor presencia de pasta en las oquedades, coincidiendo el orden de cantidad de productos de hidratación de cemento, en orden decreciente, con el ya expresado para el grado de deterioro: P-NC > P-MF > P-C > HDPE-L > FP-FO > FO.

Asimismo, según se observa en la Figura 4.46, el proceso de envejecimiento controlado a una temperatura de 60 °C no presenta signos de degradación en la parte de la fibra no inmersa en la matriz cementicia.

Se aprecia claramente, en las imágenes obtenidas en la lupa binocular, el sector de la fibra que estuvo expuesto a la pasta y el que no lo estuvo.

Estas imágenes reafirman la casi nula degradación que existe en la FO y la máxima que se produce en las fibras de PET.

Figura 4.46 - Fibras en pasta cementicia con curado en baño 60 °C, zona de transición. lupa binocular 20X.



#### 4.1.4.3 Inmersión en pasta cementicia con control de tiempo

Tomando como base las apreciaciones sobre la inclusión de matriz cementicia dentro de las oquedades que se producen por la degradación, se busca determinar si existe una relación entre la evolución de la degradación y la edad de curado de la pasta cementicia.

Para ello se introdujeron fibras (de todos los tipos excepto FO dada su aparente no degradación), en pasta de cemento de iguales características, curada hasta el momento de extracción de las fibras en cámara húmeda (temperatura  $20 \pm 1$  °C y humedad relativa  $\geq 90\%$ ).

Las edades de curado se han determinado en función del proceso de fraguado del cemento, estableciéndose: 1 hora, 4 horas, 6 horas, 8 horas, 1 día, 7 días y 28 días.

En todos los casos, luego de extraídas, las fibras se lavaron con la disolución de ácido clorhídrico diluido y se secaron para analizar las superficies con la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM).

Las imágenes obtenidas se exponen por fibra y en orden cronológico en las Figuras 4.47 a 4.51.

Observando las secuencias de imágenes se puede concluir que el proceso de degradación de las fibras no es instantáneo sino que se va incrementando con el tiempo, encontrándose a los 28 días en una situación bastante avanzada.

Los mayores ataques se han producido entre los 7 y 28 días, período posterior al fraguado del cemento y que invalida la hipótesis de que la inclusión de matriz dentro de las oquedades de la degradación se produce cuando la pasta está aún en estado plástico.

Si bien no se puede asegurar que la invalida totalmente, por lo menos no se puede afirmar que sea solamente en esa instancia cuando se produce la degradación dado que los cristales continúan su formación en la etapa de endurecimiento.

Nuevamente las fibras más afectadas son las de PET manteniendo el orden de agresión, de mayor a menor: P-NC > P-MF > P-C.

Entre las menos degradadas, las fibras de HDPE-L se han visto más afectadas que las de FP-FO en las cuales la variación de textura superficial es mínima.

Figura 4.47 – Fibras P-NC: evolución de la degradación hasta 28 días.

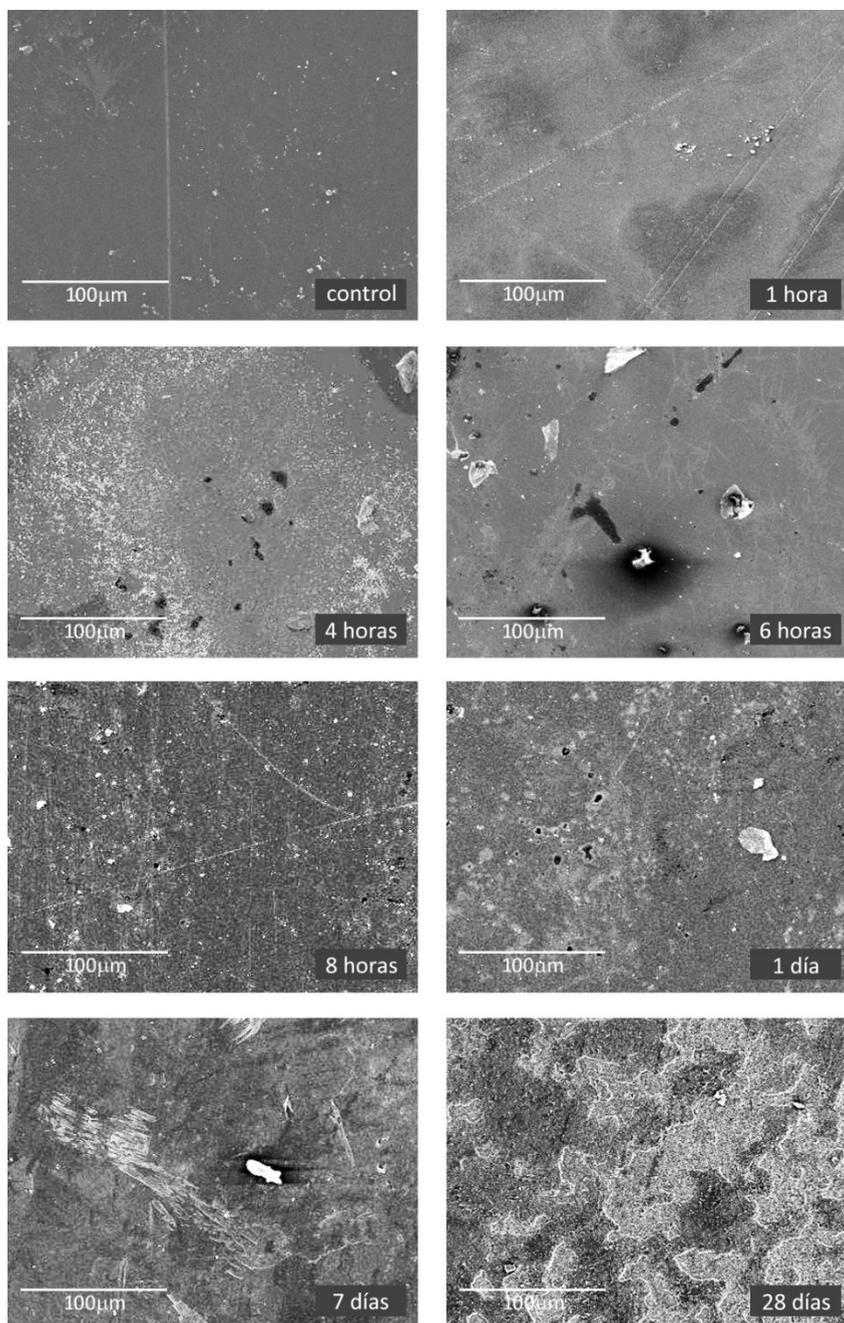


Figura 4.48 - Fibras P-C: evolución de la degradación hasta 28 días.

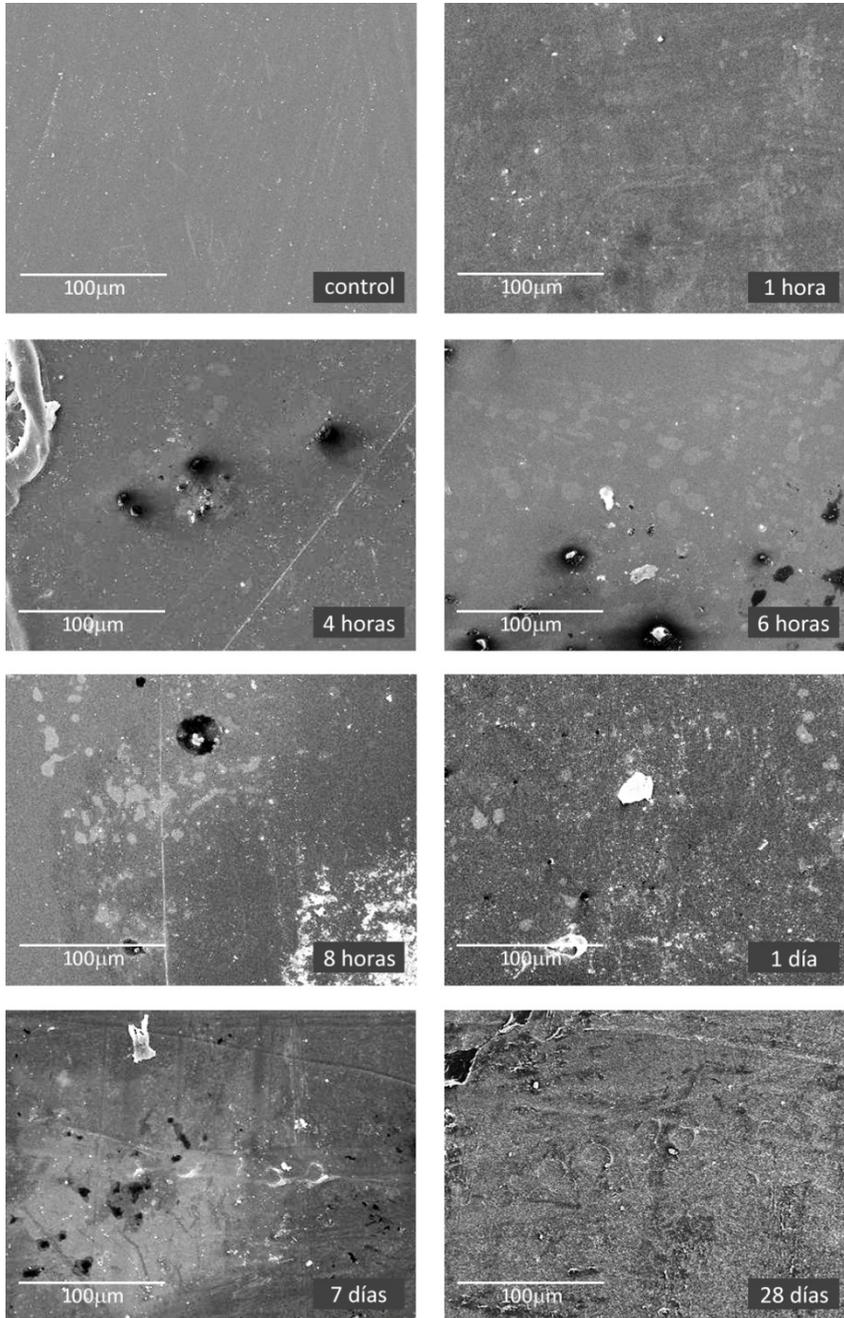


Figura 4.49 - Fibras P-MF: evolución de la degradación hasta 28 días.

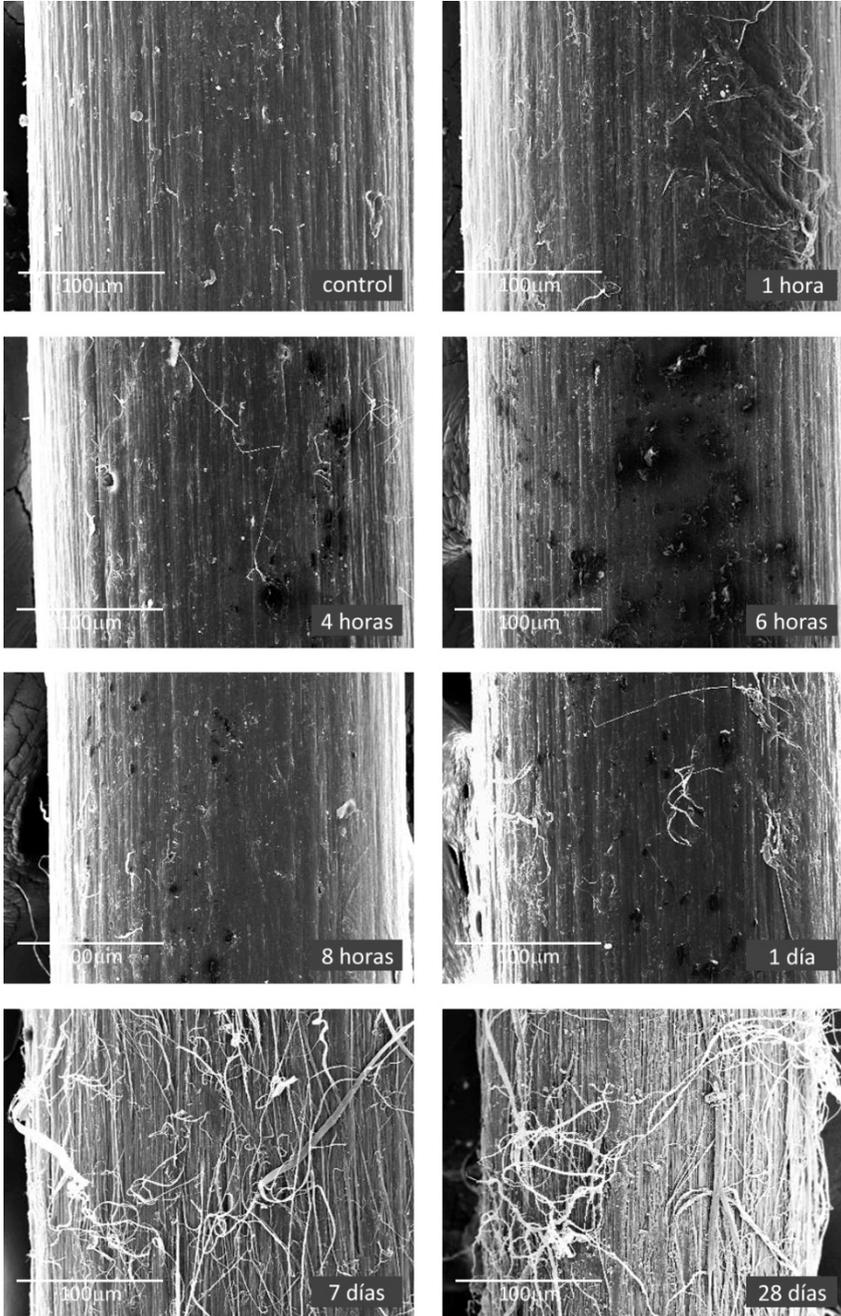


Figura 4.50 - Fibras HDPE-L: evolución de la degradación hasta 28 días.

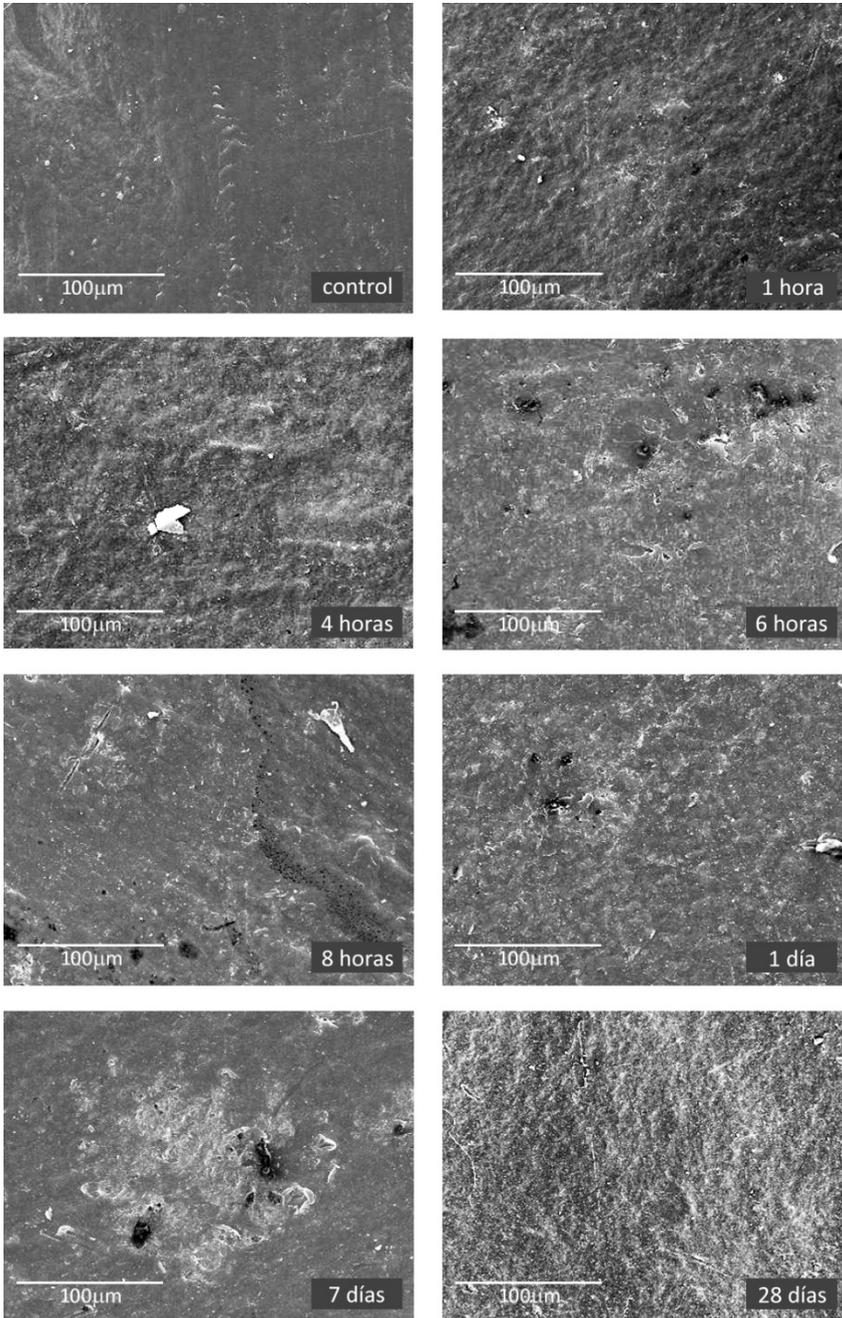
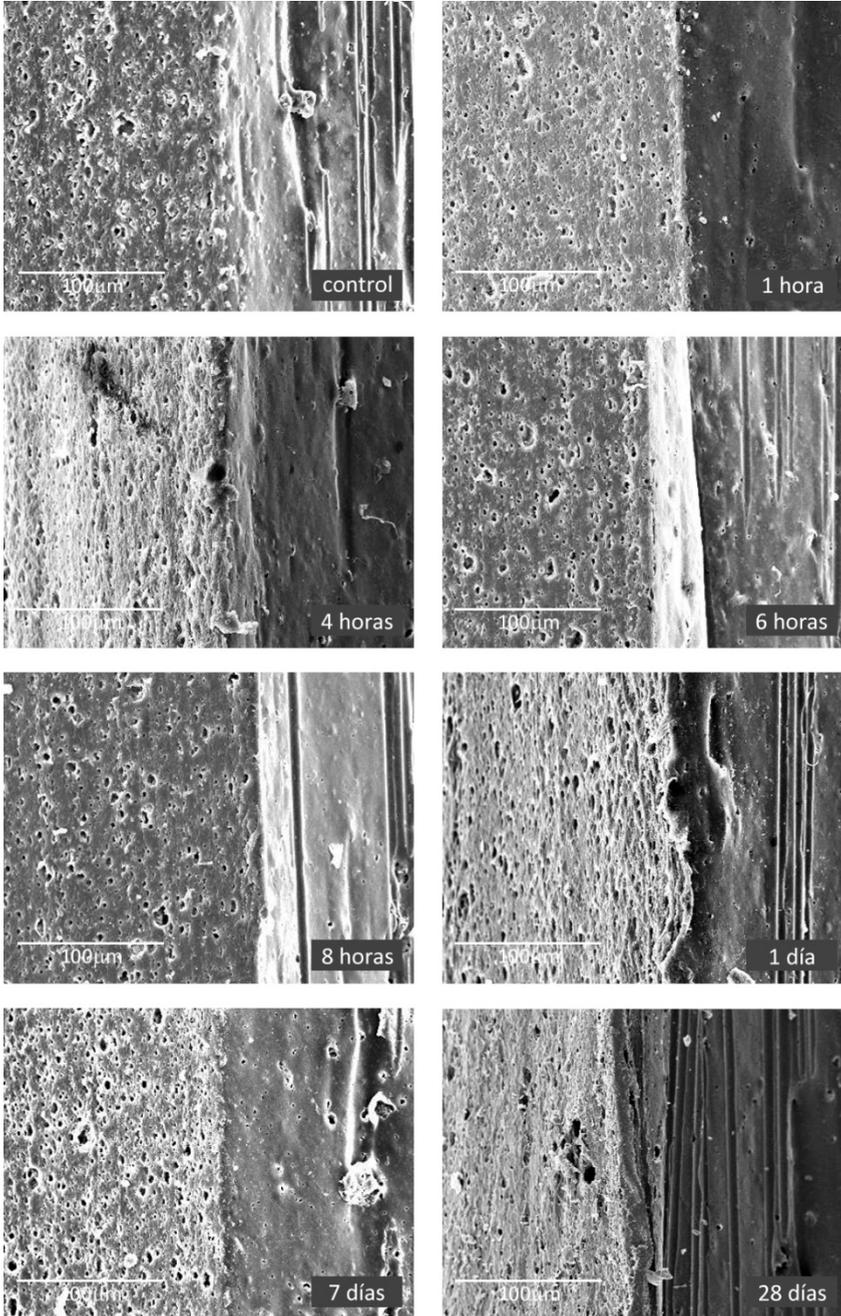


Figura 4.51 - Fibras FP-FO: evolución de la degradación hasta 28 días.



En función de estos resultados, se analizaron mediante SEM las fibras que estuvieron alojadas en pasta de cemento, y en iguales condiciones, durante 140 días (Figura 4.52).

Dado que las fibras analizadas han estado en contacto solamente con pasta cementicia, también se extrajeron muestras de aquellas que fueron empleadas en morteros con el fin de visualizar si la presencia de los áridos afecta la degradación. La edad de las probetas elegidas para este caso fue de 190 días (Figura 4.53).

El procedimiento de extracción de las fibras fue similar al empleado en las pastas, y una vez obtenidas se lavaron con la disolución de ácido clorhídrico diluido para quitar los residuos de matriz cementicia.

Con el fin de que las fibras extraídas del mortero no estuvieran afectadas por tensiones producidas en el ensayo de flexión se eligieron zonas intermedias de las probetas, fuera de las secciones donde se produjeron los mayores valores de los esfuerzos flector y cortante.

En las Figuras 4.52 y 4.53 se muestran, las micrografías obtenidas de las fibras expuestas a la matriz cementicia en estas nuevas condiciones.

Figura 4.52 - Fibras en pasta cementicia con curado en cámara durante 140 días.

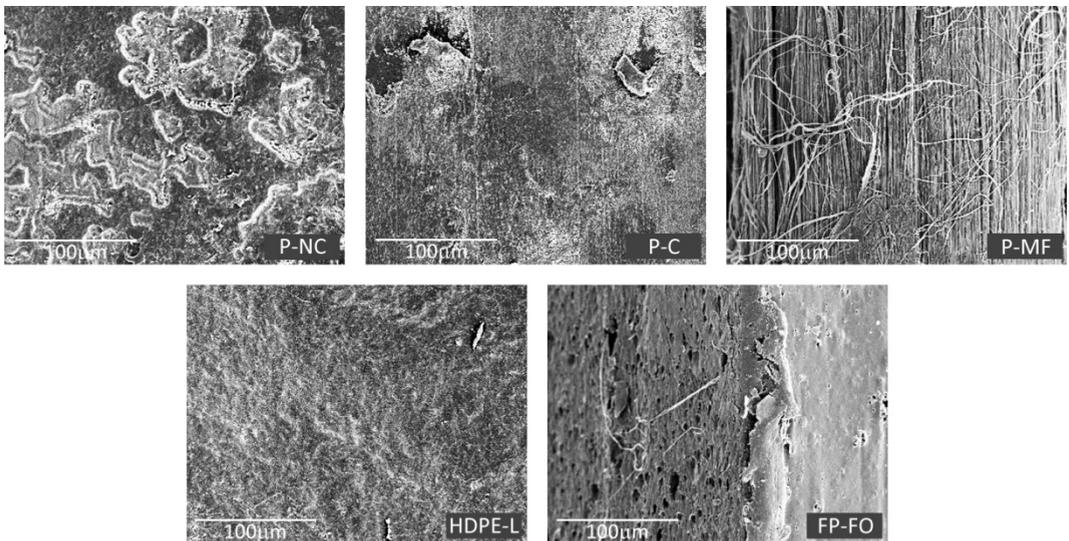
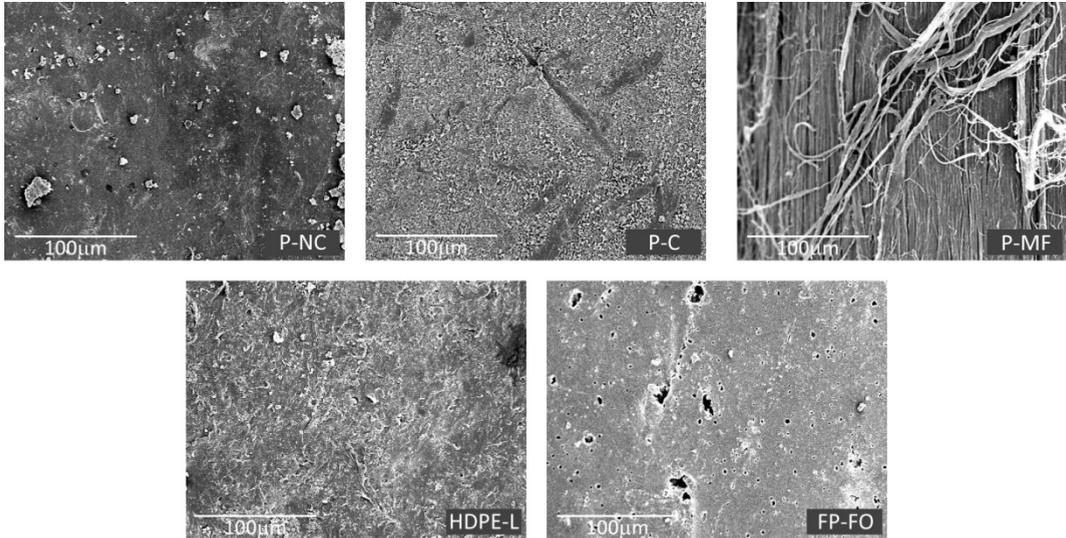


Figura 4.53 - Fibras en mortero de matriz de cemento Pórtland. Edad: 190 días.



Observando las fibras que estuvieron inmersas 140 días en la pasta cementicia se aprecia cualitativamente que, tanto en las fibras de PET como en las de HDPE, la degradación sigue avanzando pero no con la misma velocidad que en los primeros 28 días, ya que ello habría supuesto prácticamente la destrucción de la fibra.

En general, las fibras que han estado en mortero de cemento Pórtland durante 190 días no muestran diferencias significativas respecto a las fibras que han estado sumergidas en la pasta de cemento, a ese número de aumentos.

Pero si observamos la superficie a más aumentos se puede apreciar que la muestra a los 190 días en contacto con mortero corresponde a la superficie más degradada de la correspondiente a 140 días en contacto con la matriz.

En la Figura 4.54 y 4.55 se presentan las superficies de las fibras P-NC y P-C a 3500 aumentos donde se aprecian claramente las diferencias.

La degradación presente a los 140 días con la pasta cementicia es mucho menor que la presente a los 190 días en mortero. Dada la diferencia de edades de ambas muestras no sería oportuno afirmar que la mayor degradación sea producto de los demás compuestos del mortero (áridos). Ahora, si consideramos que a esas edades las

reacciones de hidratación del cemento son mucho menores, se podría decir que existen grandes posibilidades de que, por el árido o por la forma de producción del mortero fibro-reforzado, la degradación de las fibras es mayor.

Figura 4.54 - Fibras P-NC: comparación degradación en pasta y mortero de cemento.  
A – en pasta cementicia 140 días ; B – en mortero de cemento 190 días

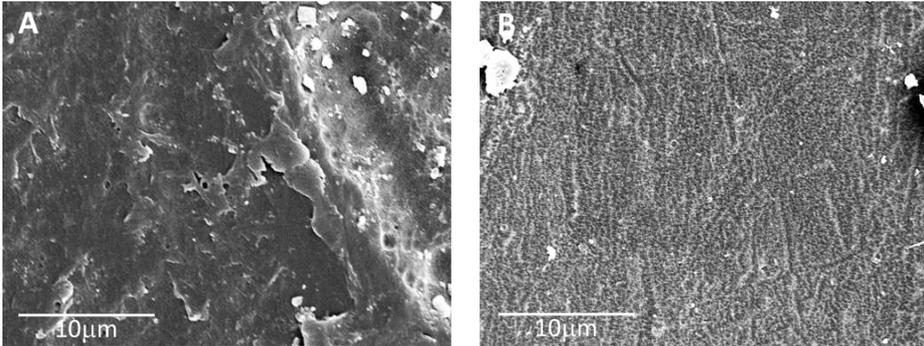
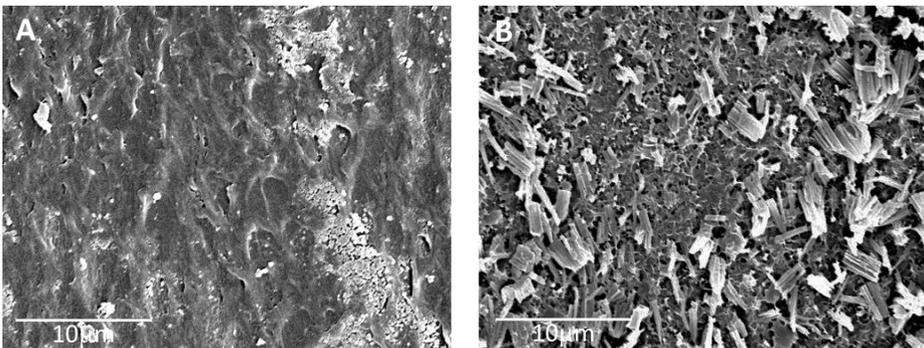


Figura 4.55 - Fibras P-C: comparación degradación en pasta y mortero de cemento.  
A – en pasta cementicia 140 días ; B – en mortero de cemento 190 días



#### 4.1.4.4 Inmersión en pasta cementicia con adición de puzolanas

Según los resultados obtenidos en los estudios detallados en puntos anteriores, se propuso realizar una prueba de iguales características que las explicadas en el punto 4.1.4.2 sustituyendo un 20% en peso del cemento Pórtland por puzolanas de diferentes orígenes.

El objetivo de este estudio inicial sobre la durabilidad de estas fibras en un mortero mixto responde a los antecedentes que existen sobre estos materiales.

Los estudios realizados en el campo de la construcción muestran un mejor desempeño de los mismos desde el punto de vista de las resistencias mecánicas y de durabilidad [25].

Al reaccionar los materiales puzolánicos con el hidróxido de calcio, liberado en la hidratación del cemento Pórtland, se produce una moderada reducción de la porlandita, y por tanto del pH [26], siendo parte del propósito para evaluar la degradación de las fibras.

En esta instancia, se utilizaron las siguientes puzolanas: ceniza de cáscara de arroz (RHA), residuo de catalizador de craqueo catalítico del petróleo (FCC), ceniza de lodo de depuradora (SSA), ceniza volante (FA) y residuo de ladrillo cerámico (CW), con las características mencionadas en el Capítulo 3.

La elección de las mismas responde a investigaciones sobre los efectos de la adición al cemento Pórtland, confirmando la viabilidad técnica en la utilización de estos materiales con efectos puzolánicos [25-28].

Siguiendo el procedimiento empleado para las pastas de cemento Pórtland, tras un curado de 24 horas en cámara húmeda (temperatura  $20 \pm 1$  °C y humedad relativa  $\geq 90\%$ ) estas pastas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento controlado sumergiendo los botes en agua a una temperatura de 60 °C durante 15 días, así como el lavado con una disolución de HCl diluido y luego agua destilada para dejar la superficie limpia, sin residuos de pasta.

En las Figuras 4.56 a 4.61 se pueden observar las micrografías obtenidas mediante SEM, según tipo de fibra, donde se muestra la degradación presente con las pastas mixtas y la que produjo la pasta de cemento sin adiciones.

Figura 4.56 – Fibras de P-NC en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

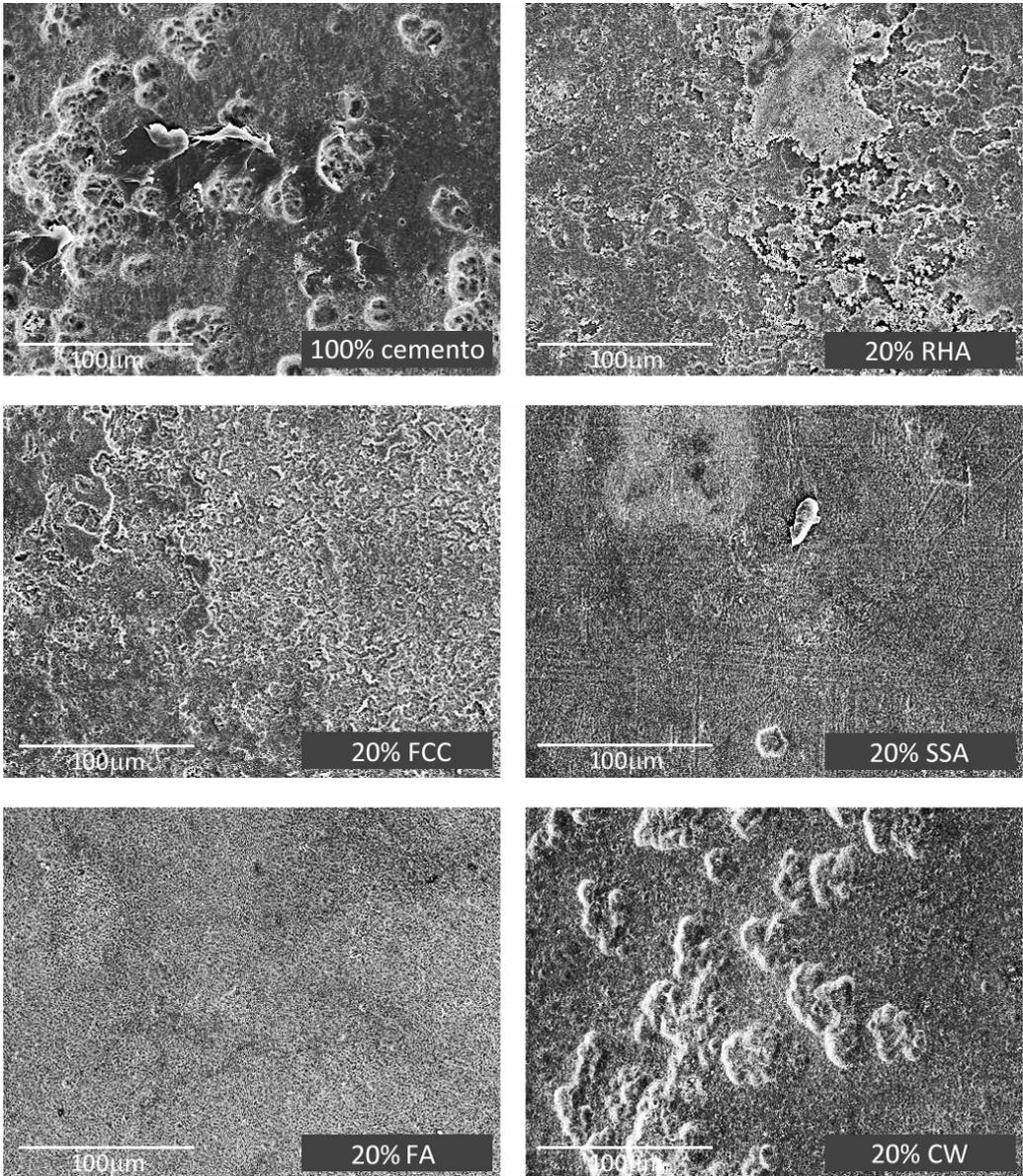


Figura 4.57 – Fibras de P-C en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

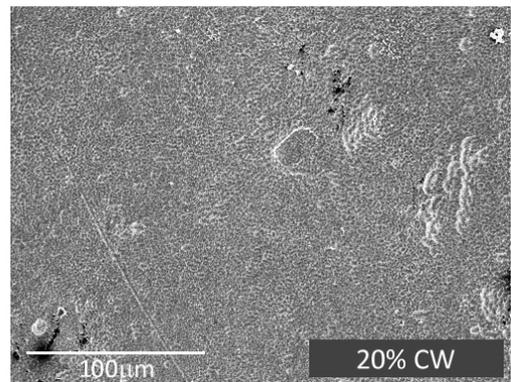
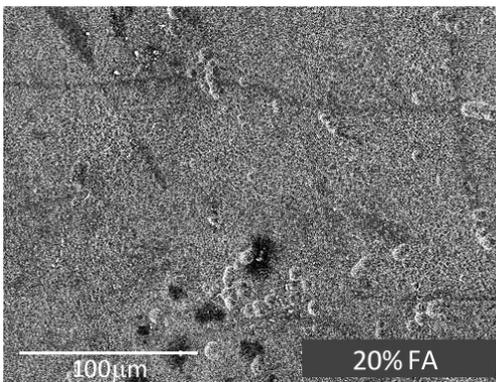
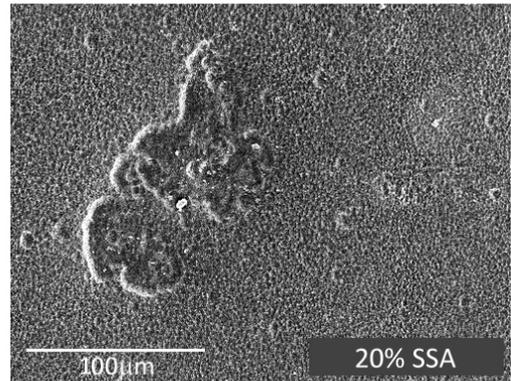
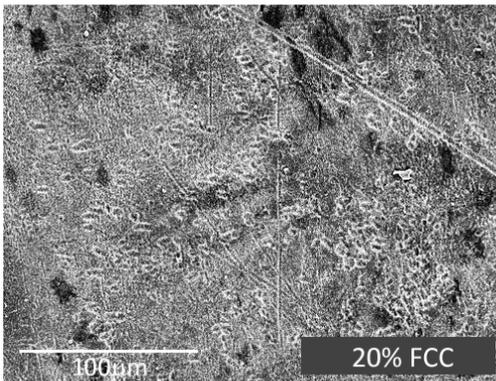
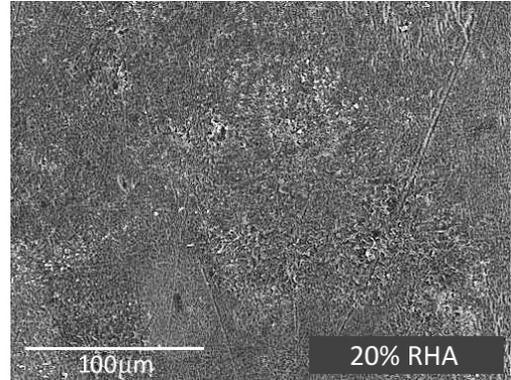
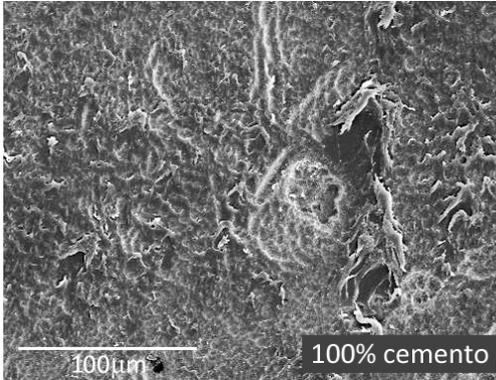


Figura 4.58 – Fibras de P-MF en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

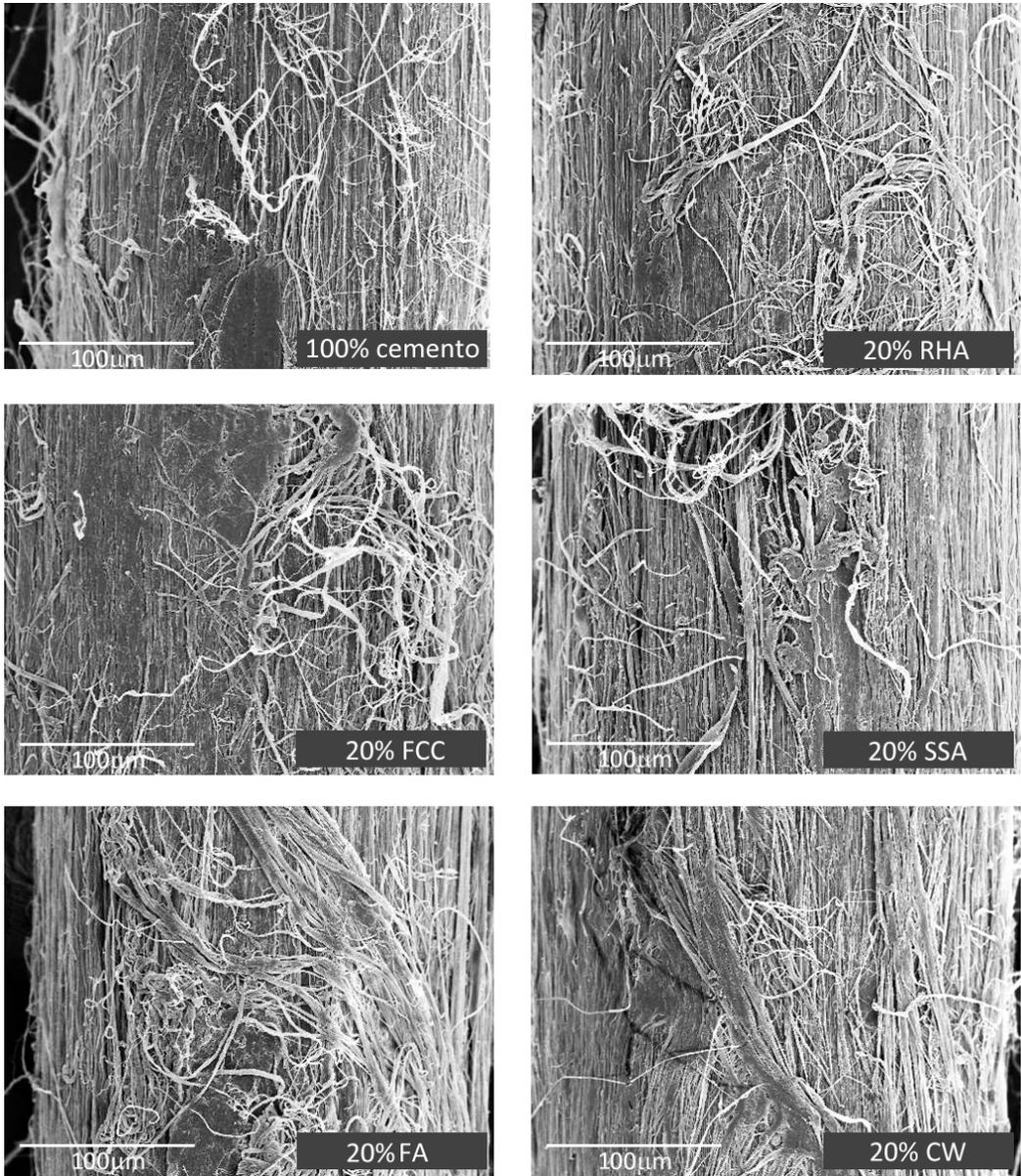


Figura 4.59 – Fibras de HDPE-L en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

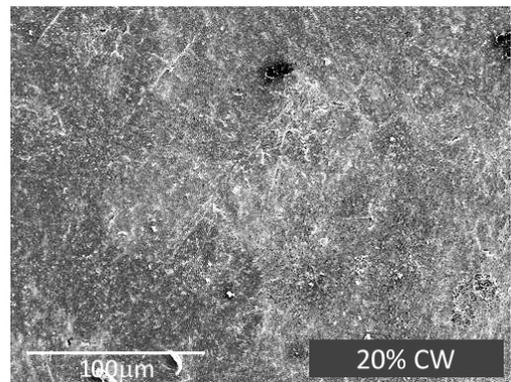
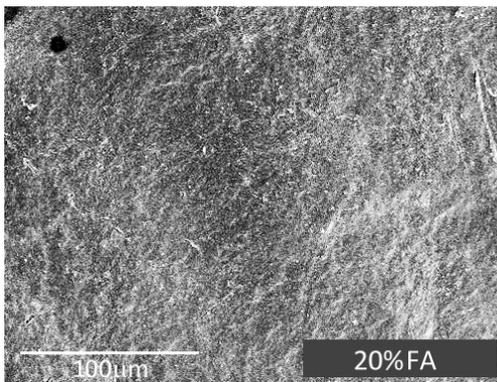
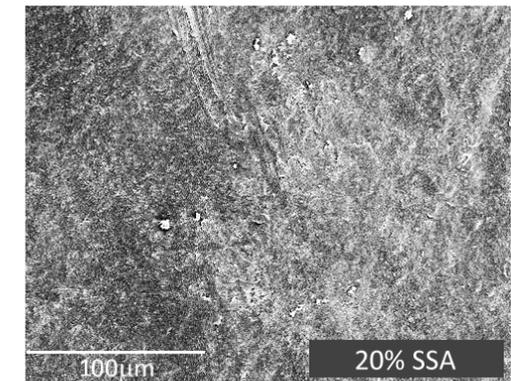
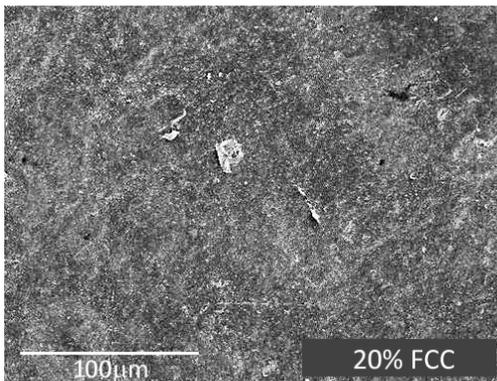
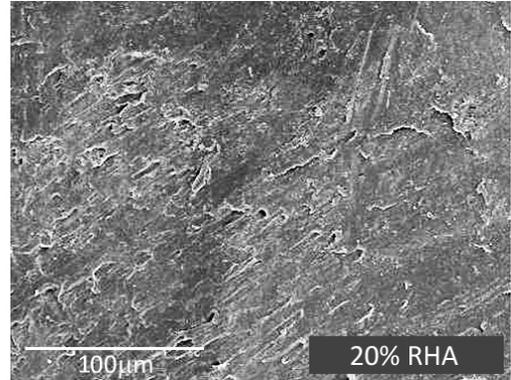
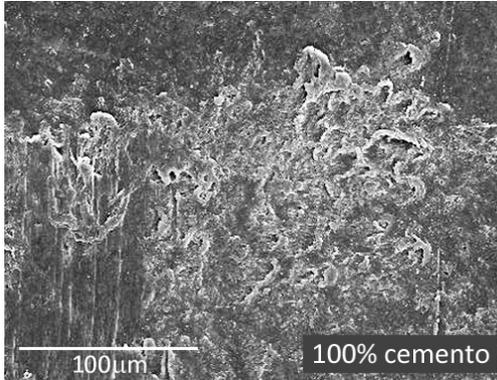


Figura 4.60 – Fibras de FO en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

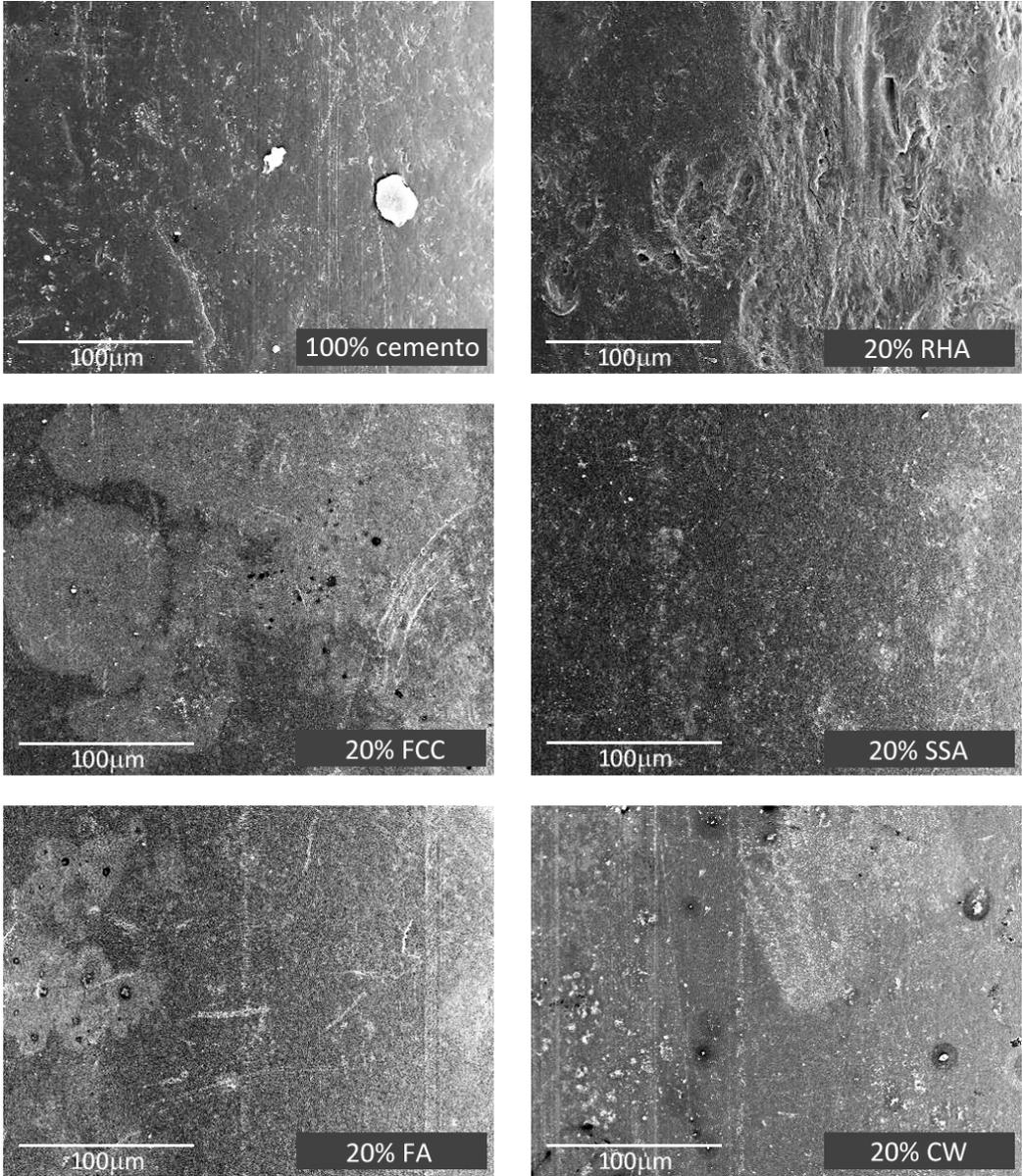
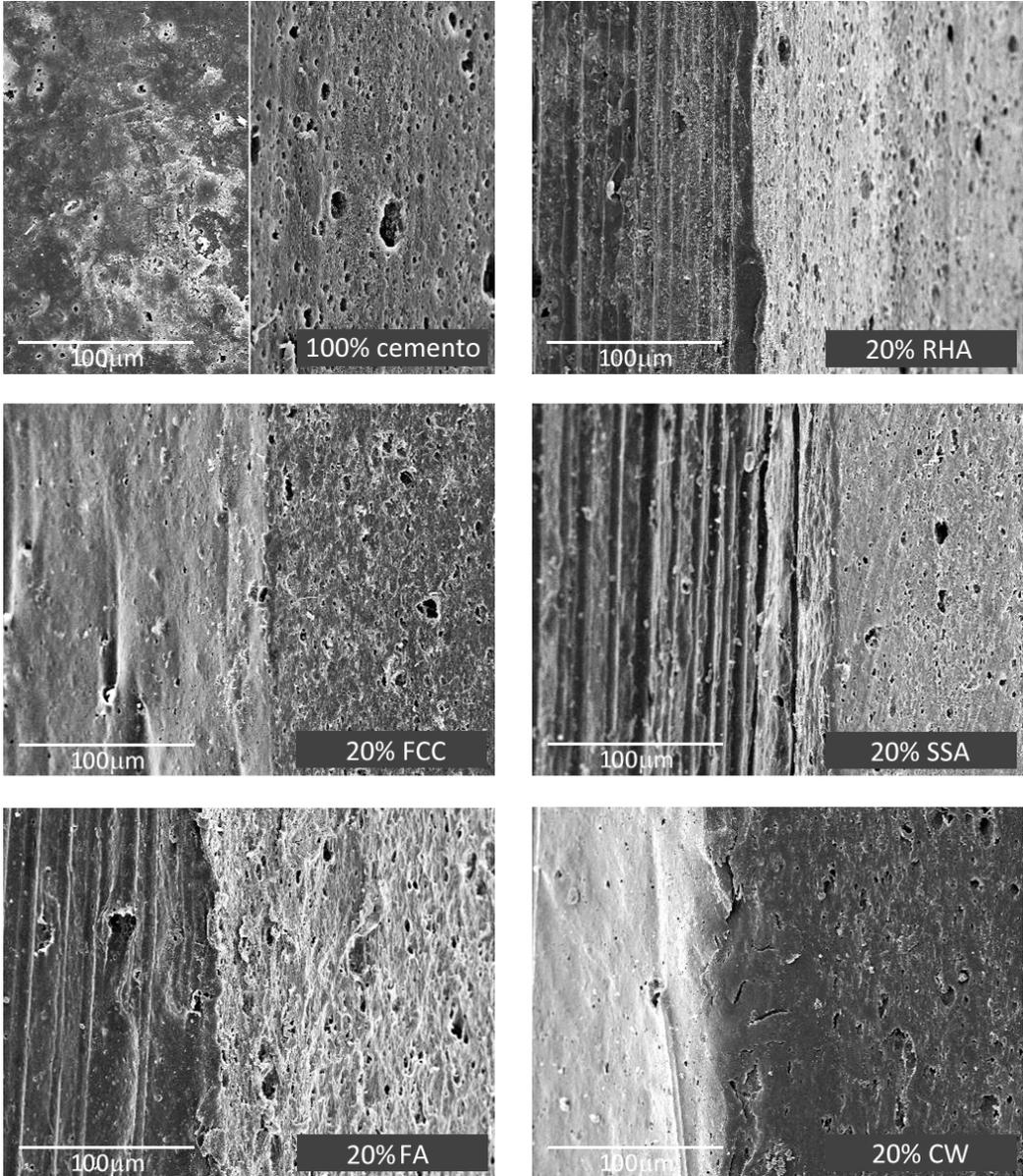


Figura 4.61 – Fibras de FP-FO en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.



Paralelamente, como forma de verificar si la alcalinidad de la matriz es la única causa de la degradación, se comprobó el pH de las pastas mixtas y control (cemento sin puzolana) a edades de curado de 1 día, 7 días y 28 días.

Siguiendo el procedimiento indicado en el punto 3.2.2., se obtuvieron los resultados que se indican en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 - Valores de pH de las pastas mixtas y el control a 1, 7 y 28 días.

	1 día	7 días	28 días
<b>CONTROL</b>	12,51	12,44	12,80
<b>RHA</b>	12,45	12,44	12,64
<b>FCC</b>	12,43	12,37	12,45
<b>SSA</b>	12,49	12,39	12,59
<b>FA</b>	12,44	12,39	12,65
<b>CW</b>	12,44	12,41	12,71

Si observamos el comportamiento de cada fibra en las distintas pastas encontramos que:

En las fibras P-NC, si bien se degradaron en todos los casos, la menor agresión se visualiza con el empleo de ceniza volante (FA) y ceniza de lodos de depuradora (SSA). Con las otras puzolanas la degradación presenta características diferentes que con la pasta de cemento (Figura 4.56).

Las fibras P-C, muestran menor degradación cuando se empleó como puzolanas ceniza de cáscara de arroz (RHA) y residuo de ladrillo (CW). Una degradación media se aprecia cuando se emplea ceniza de lodos de depuradora (SSA) y cenizas volantes (FA) (Figura 4.57). Comparando estas imágenes con las fibras P-NC se puede apreciar que, si bien ambas proceden de envases post-consumo de PET, la degradación que se les produce es distinta, siendo mayor en las que corresponden a bebidas no carbonatadas (P-NC).

Para las P-MF las menores degradaciones se aprecian en las pastas con adición de RHA y FCC. Estas fibras son las más complejas de cuantificar su degradación por procesos visuales debido a que su conformación multifilamento se ve afectada por una

desfibrilación que puede ser producida por la agresión a cada uno de los filamentos, al material de unión o a su conjunto (Figura 4.58).

De acuerdo a las micrografías en las fibras de HDPE-L las mayores degradaciones se dan cuando se emplea ceniza de cáscara de arroz (RHA), siendo similares a las producidas con la pasta control de cemento. Con las otras puzolanas presenta alteraciones de menor entidad (Figura 4.59).

En el caso de las de FO se observa que con las puzolanas, a diferencia de lo que ocurría con el cemento, sí existe una ligera modificación de la textura superficial. Se visualiza con mayor intensidad cuando se emplea ceniza de cáscara de arroz (RHA), y apenas notoria con las demás puzolanas (Figura 4.60).

Finalizando este análisis, en las fibras FP-FO se visualiza degradación en las pastas mixtas con FA y casi sin alteraciones con el empleo de las otras adiciones (Figura 4.61).

Respecto al pH se puede concluir que esta pequeña adición de material puzolánico ha generado una disminución respecto a la pasta control pero está lejos de ser una diferencia significativa. Se ha alcanzado, como máximo, una disminución del 1% para pastas con 1 y 7 días de edad, y cerca del 3% para 28 días. Ello es debido a que si bien las puzolanas consumen portlandita, en las proporciones utilizadas no se consigue combinar puzolánicamente toda esa portlandita presente en la mezcla, de modo que el pH final de la pasta sigue siendo aproximadamente el que origina una disolución saturada de hidróxido de calcio.

#### 4.1.5 Evaluación de los estudios preliminares

De la caracterización física de las fibras lo que se puede observar es que, además de pertenecer a plásticos distintos, no presentan parámetros comparables. Ni su forma, densidad o textura superficial nos permiten dar una caracterización única por lo que, al hablar comparativamente de ellas, nos tendremos que referir a sus prestaciones, a la magnitud de los aportes que produzcan como fibro-refuerzo de la matriz seleccionada.

Asimismo, en la caracterización mecánica de las mismas encontramos que son fibras de bajo módulo de elasticidad, siendo el módulo de la matriz cementicia (15-40 GPa) el límite que define los valores que se consideran bajos y altos [3]. Esta identificación nos

indica que su empleo como fibro-refuerzo se debe centrar en la búsqueda de mejoras respecto a la capacidad de deformación, dureza, resistencia al impacto y control de la fisuración más que al aumento de resistencia del material compuesto. En la mayoría de las aplicaciones, la mejora de estas propiedades es de mayor importancia que un modesto aumento en la resistencia a la tracción o flexión.

Si analizamos entonces el comportamiento de estas fibras en el material compuesto, podemos observar que los incrementos obtenidos, con el porcentaje y longitud de fibra empleado en esta primera etapa, muestran que no es desacertado pensar que fibras obtenidas directamente del reciclaje de materiales plásticos puedan ser empleadas para producir morteros fibro-reforzados (FRM).

Los incrementos obtenidos en las prestaciones de los morteros reforzados con PET multifilamento comparados con los reforzados con PET de envases post-consumo, observando la textura superficial de ambos tipos de fibra, hace pensar que la diferencia radica en la adherencia, sobre la que hay que continuar trabajando.

Por su parte, como se mencionó en el punto 4.1.4., las fibras conformadas por multifilamentos producidas para la elaboración de escobas presentan diferencias considerables entre ellas. PV-MF y PT-MF, si bien son las más resistentes a tracción, presentan un desempeño inferior a las fibras P-MF. Este es el motivo por el que se opta continuar el estudio solamente con las fibras elaboradas con PET proveniente de residuos de envases post-consumo (P-MF) entendiendo que, a pesar de ser realizadas por reprocesado del residuo, presentan un aporte al destino final de los mismos.

De los estudios preliminares de degradación, se observa que los residuos de PET, obtenidos de envases post-consumo, empleados en morteros de cemento Pórtland sin ninguna protección, se degradan superficialmente en forma progresiva. No se puede asegurar que este proceso sea indefinido pero las micrografías expuestas indican que, después del estudio con envejecimiento controlado mediante la introducción durante 15 días en baño a 60 °C, la degradación continúa.

Las fibras de HDPE-L han resultado más resistentes a los ataques producidos por la pasta cementicia a corto plazo, demostrando a largo plazo que igualmente se degradan aunque en menor medida que las fibras de P-NC y P-MF.

Ambos residuos obtenidos del cableado de fibra óptica, FO y FP-FO, presentan las mejores resistencias a estas agresiones, particularmente la primera que se ha mostrado de forma casi invariable en los distintos períodos de tiempo y condiciones.

Los valores obtenidos con la adición de puzolanas ponen de manifiesto que los porcentajes empleados (20% de sustitución) no modifican de forma apreciable el pH. Esto podría deberse a que la pasta se encuentra sobresaturada en portlandita y, aun habiendo adicionado puzolanas, esta fijación no se traduce en un descenso apreciable del pH, por lo que se deberá incrementar el contenido de puzolanas para confirmarlo.

La adición de puzolanas al cemento Pórtland, en general, ha disminuido la degradación de las fibras pero no se corresponden con todos los tipos. Se ha visto que cada puzolana no interactúa de igual modo con las fibras lo que hace pensar que la degradación de las mismas no corresponde solamente al medio básico que representa la matriz de cemento, por lo que se deben verificar estas tendencias.

El procedimiento empleado para la elaboración de los morteros fibro-reforzados con estos materiales debe ajustarse para garantizar que durante el amasado los áridos no dañen las fibras o, en caso de producirse alguna alteración ésta sea favorable para mejorar la adherencia.

En general, con los resultados obtenidos se puede afirmar que las fibras empleadas en esta etapa de la investigación tienen un potencial importante en cuanto al refuerzo de morteros de matriz de cemento que integren elementos constructivos sometidos a flexión o requieran ser tenaces ante las acciones actuantes.

Los resultados obtenidos de estos estudios preliminares nos permiten acotar el número de fibras y plantear líneas de trabajo con las cuales continuar la investigación. Llegado a este punto, se opta por dejar reservadas para investigaciones futuras las fibras provenientes del residuo de cableado de fibra óptica por entender que ambas, FP y FP-FO, presentan características distintas entre ellas y con las demás fibras estudiadas, constituyendo una línea de estudio en sí misma.

De igual modo se procederá con las de HDPE, se retomará su estudio en un futuro, teniendo como base los resultados primarios aquí presentados, tanto desde el punto de vista resistente como de degradación.

Esto nos permite concentrarnos en 3 tipos de fibras que, si bien tienen características diferentes entre sí, presentan en común el material de origen: PET proveniente de envases post-consumo.

## 4.2 Refuerzo de matrices cementicias con fibras provenientes de envases post-consumo de PET

En esta segunda parte de la investigación se profundiza en el conocimiento de aquellos parámetros necesarios para la elaboración del material compuesto basado en una matriz cementicia reforzada con fibras elaboradas con materiales residuales.

Según lo expresado en el punto anterior, las fibras utilizadas se han acotado a aquellas provenientes de residuos de envases post-consumo, tanto sea por la elaboración directa a través de su corte mecánico (P-NC y P-C) o por su conformación con material reprocesado de estos residuos (P-MF), aunque esta última sólo se utilizará como referencia en algunos estudios de características mecánicas.

Profundizando los estudios de durabilidad de las fibras, a través de las técnicas y procedimientos indicados en el Capítulo 3 (TG y SEM), analizando la interfaz entre fibra y matriz y optimizando el diseño del material compuesto (dimensión y porcentaje de fibras a emplear), se completa el estudio con la elaboración y ensayo de elementos laminares a los efectos de conocer las prestaciones del material compuesto en una aplicación constructiva concreta.

### 4.2.1 Caracterización mecánica de fibras

En las Figuras 4.62 y 4.63 se presentan las características mecánicas de las fibras utilizadas en esta parte de la investigación y que han sido previamente analizadas en el punto 4.1.2.

Examinando las fibras P-NC y P-C se observa que la diferencia de resistencia y módulo elástico es coherente con la diferencia de requerimientos que tienen los dos tipos de envases de donde provienen.

Figura 4.62 - Resistencia a tracción de fibras de PET

$\sigma_{pr}$  - límite de proporcionalidad (en este caso = límite elástico);  $\sigma_{T\text{ máx}}$  - resistencia máxima a tracción

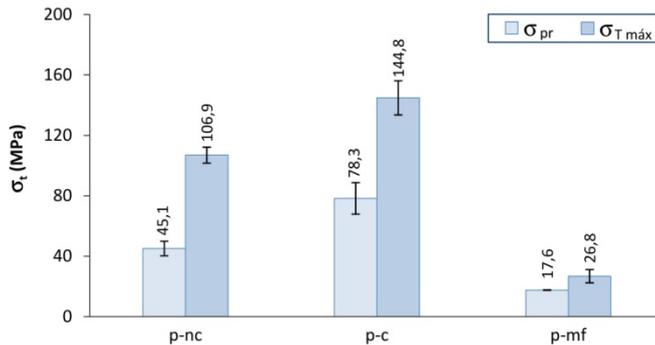
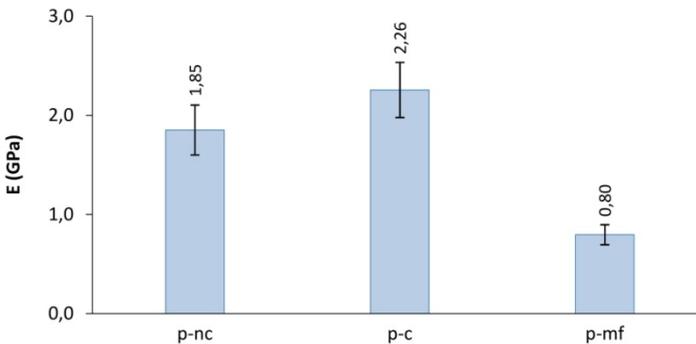


Figura 4.63 – Módulo Elástico a tracción de fibras de PET



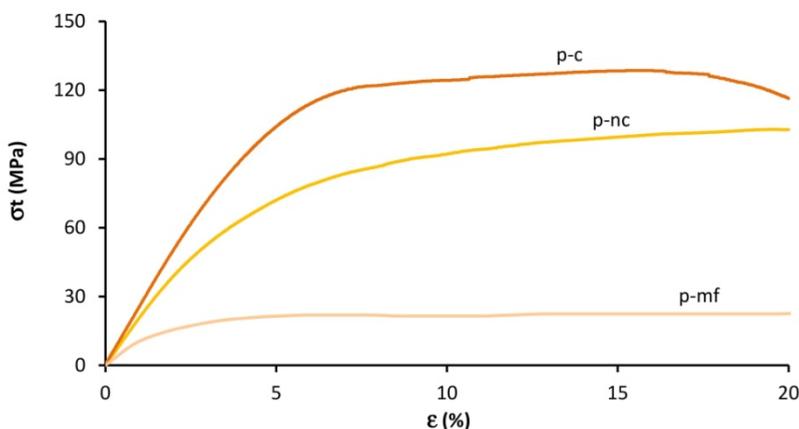
Como se ha mencionado en el Capítulo 1, los envases para bebidas carbonatadas además de ser más resistentes por la presión del gas que soportan necesitan ser más impermeables a los gases por lo cual su estructura es más rígida que la de los envases utilizados para bebidas no carbonatadas.

Las fibras elaboradas para la producción de escobas (P-MF), presentan ambos valores, resistencia y módulo elástico, mucho más bajos que los determinados para el material

de envases. Como se mencionó en el punto 4.1., uno de los factores de esta diferencia puede ser que este material haya sido reprocesado más de dos veces, y otro, no menos importante, es que los residuos utilizados no provengan de un solo tipo de envase y en la mezcla intervengan factores ajenos al PET como pigmentos y aditivos.

Analizando las curvas tensión/deformación de estos materiales (Figura 4.64) se observa que el P-C obtiene su ruptura a menores deformaciones que las otras dos fibras. Asimismo, este material es el menos elástico de los tres.

Figura 4.64 - Diagrama tensión/deformación a tracción de fibras de PET



Se observa también que para las fibras P-MF el límite de proporcionalidad lo alcanza a una deformación aproximada del 2%, superior al valor de deformación de la primera fisura en una matriz cementicia.

### 4.2.2 Durabilidad

Para analizar la durabilidad del material compuesto se ha realizado el estudio de los componentes, matriz y fibra, así como de su interfaz.

Continuando los trabajos preliminares de degradación, las fibras se han expuesto a distintos medios observando los cambios presentados en su superficie por medio de SEM. Se analizó la evolución de la resistencia a tracción de fibras degradadas con matriz cementicia y se ha empleado la técnica de TG descrita en el Capítulo 3, para el estudio

de matrices y fibras. La interfaz entre ambos materiales se analizó a través de microscopía electrónica de barrido (SEM). Las experiencias se exponen individualmente ordenadas según el objeto de estudio.

Según observación realizada en el punto 4.1.4, que las fibras P-C presentan menor grado de degradación que las fibras P-NC, en algunas de las experiencias se ha optado por estudiar solamente muestras de las últimas como representativas de ambos materiales.

#### 4.2.2.1 Estudio, mediante microscopía electrónica de barrido, de fibras expuestas a distintos medios.

Continuando la línea de investigación iniciada en los estudios preliminares, se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) fibras P-NC y P-C que han estado inmersas en pasta de hidróxido cálcico, soluciones alcalinas de cemento e hidróxido cálcico, pastas mixtas y curados a distintas temperaturas.

La exposición de los resultados y su discusión se organiza según los procedimientos y técnicas empleadas.

#### Hidróxido Cálcico

En los trabajos preliminares se extrajo como conclusión primaria que la diferencia presentada entre las distintas degradaciones y la mínima variación del pH de las matrices utilizadas, ponían en duda que la única causa de la degradación sea la alcalinidad de la matriz de cemento Pórtland.

En las matrices cementicias el alto valor de pH está relacionado con el contenido de portlandita (hidróxido cálcico). Para determinar si el contacto con este compuesto es el determinante de la degradación se introdujeron fibras de P-NC y P-C en una pasta elaborada con hidróxido cálcico de pureza comprendida entre el 95% y el 100% y agua, en una relación 1:1.

A los botes con este contenido se los mantuvo en baño a 60 °C durante 15 días, igual período que se utilizó con la pasta de cemento Pórtland en los estudios preliminares.

En las Figuras 4.65 y 4.66 se presentan las microfografías comparando ambas situaciones, cemento Pórtland e hidróxido cálcico.

Figura 4.65 - Fibras P-NC: degradación en pasta de cemento e hidróxido cálcico.  
A – en pasta cementicia ; B – en hidróxido cálcico

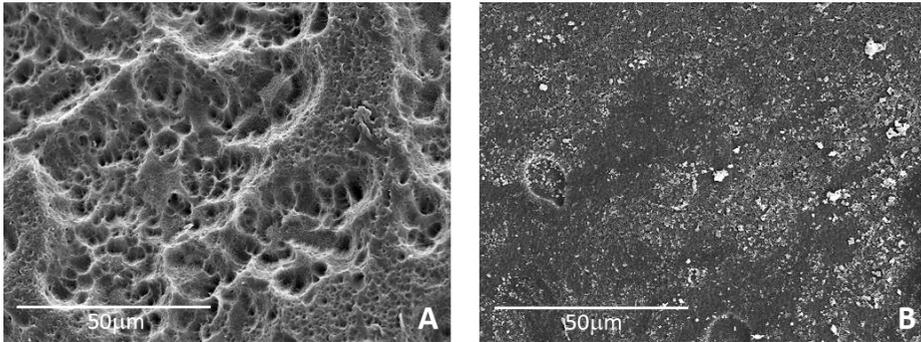
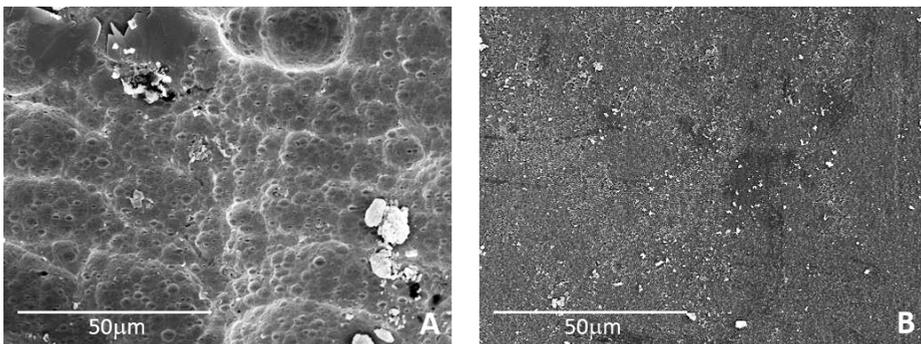


Figura 4.66 - Fibras P-C: degradación en pasta de cemento e hidróxido cálcico.  
A – en pasta cementicia ; B – en hidróxido cálcico



Estas microfografías muestran que la exposición al hidróxido cálcico en pasta, si bien produce un alteración en la textura superficial, no alcanza los niveles de degradación que se originan cuando las fibras se introducen en cemento Pórtland.

Se realiza nuevamente la exposición a este hidróxido pero ahora en una solución saturada del mismo. De igual forma se procede con cemento y se introducen en estas soluciones muestras de ambas fibras.

En las Figuras 4.67 y 4.68 se exponen las micrografías tomadas luego de 28 días de inmersión en las soluciones saturadas a temperatura controlada de Laboratorio,  $20 \pm 1$  °C.

Figura 4.67 - Fibras P-NC: degradación en soluciones saturadas.

A – en solución saturada de cemento Pórtland; B – en solución saturada de hidróxido cálcico

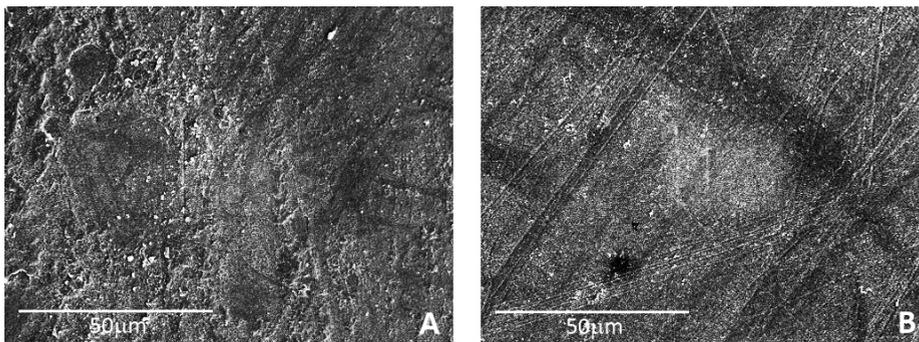
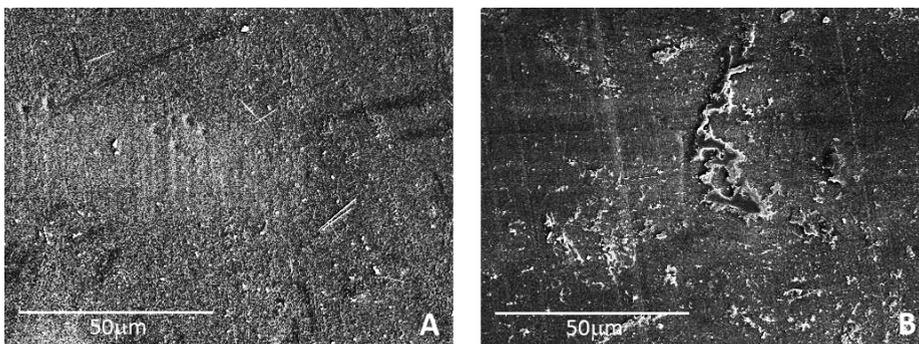


Figura 4.68 - Fibras P-C: degradación en soluciones saturadas.

A – en solución saturada de cemento Pórtland; B – en solución saturada de hidróxido cálcico



La degradación observada en estas micrografías confirma que con hidróxido cálcico es menor que con cemento Pórtland, si bien las diferencias no son tan importantes como con el empleo de pastas.

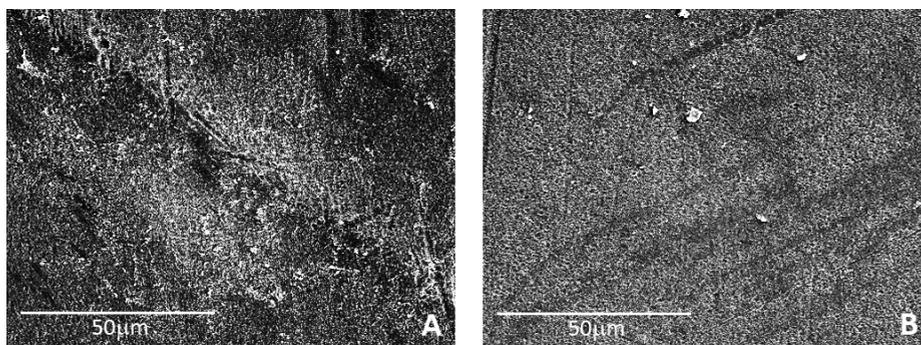
En las muestras expuestas al cemento, además de la forma de exposición al compuesto, pasta o disolución saturada, difieren en el procedimiento de curado. Mientras la disolución se mantuvo a temperatura de Laboratorio ( $20 \pm 1$  °C), la pasta se sumergió en un baño a 60 °C. Ésta última, como se ha observado en el punto 4.1.4.2., no produce

modificaciones por sí misma a las fibras al ser menor que la temperatura de transición vítrea de estos materiales

También se ha mencionado que al someter a las pastas a este proceso de curado se aceleran las reacciones químicas que se producen en la hidratación del cemento, por lo cual no son comparables los tiempos de exposición en ambas situaciones.

Contemplando realizar una comparación con mayor tiempo de exposición se observaron las fibras P-NC inmersas en las soluciones saturadas durante 100 días (Figura 4.69).

Figura 4.69 - Fibras P-NC degradación en soluciones saturadas en 100 días.  
A – en solución saturada de cemento Pórtland; B – en solución saturada de hidróxido cálcico



Se observa que el proceso de degradación continúa en ambos casos y que el cambio en la textura superficial que provoca el hidróxido cálcico sigue siendo menor que el producido por el cemento Pórtland.

### Matrices Mixtas

Según lo observado en los estudios preliminares, en cuanto a la degradación con matrices mixtas, se profundizó en el estudio sobre el comportamiento de las fibras inmersas en matrices de cemento Pórtland-puzolana.

De las adiciones utilizadas en el punto 4.1.4.4 se eligieron dos para hacer pastas con una proporción mayor de puzolana: RHA por ser un residuo de fácil acceso también en América Latina, y FCC porque, además de ser un residuo, los resultados obtenidos

muestran que con una sustitución del 20% produce una degradación intermedia en este tipo de fibras.

Las micrografías obtenidas se presentan en las Figuras 4.70 a 4.73. En ellas podemos observar las degradaciones producidas en fibras P-NC y P-C por pastas mixtas cemento Pórtland/puzolana, elaboradas con una sustitución de 20% y 50% de cemento Pórtland por puzolana, curadas en baño a 60 °C durante 15 días.

Con el empleo de ceniza de cáscara de arroz (RHA) como puzolana al aumentar el porcentaje se obtienen mejores resultados en las fibras P-C pero la agresión no desaparece totalmente.

Figura 4.70 – Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-RHA) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% RHA; B – 50% cemento Pórtland + 50% RHA

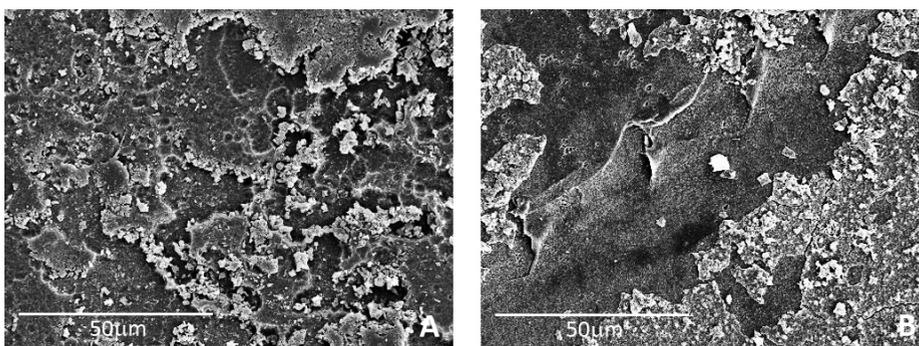


Figura 4.71 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-RHA) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% RHA; B – 50% cemento Pórtland + 50% RHA

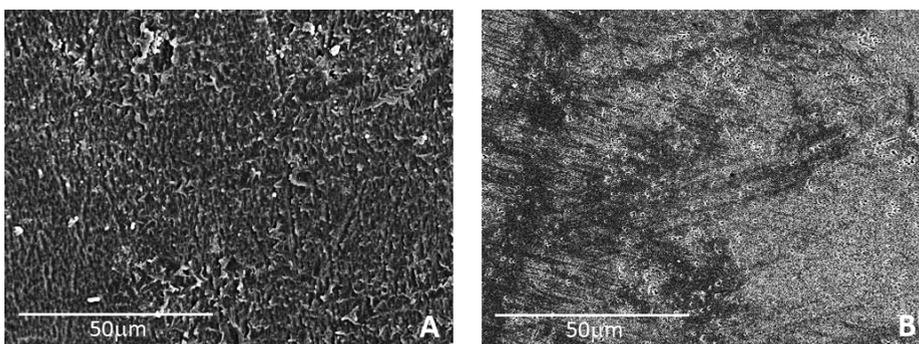


Figura 4.72 – Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-FCC) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% FCC; B – 50% cemento Pórtland + 50% FCC

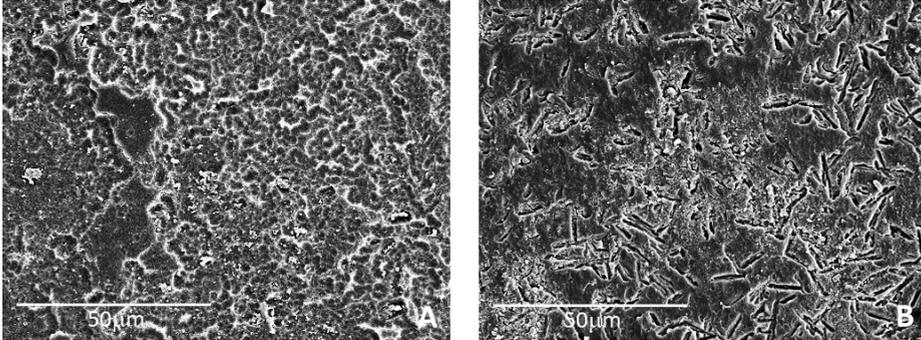
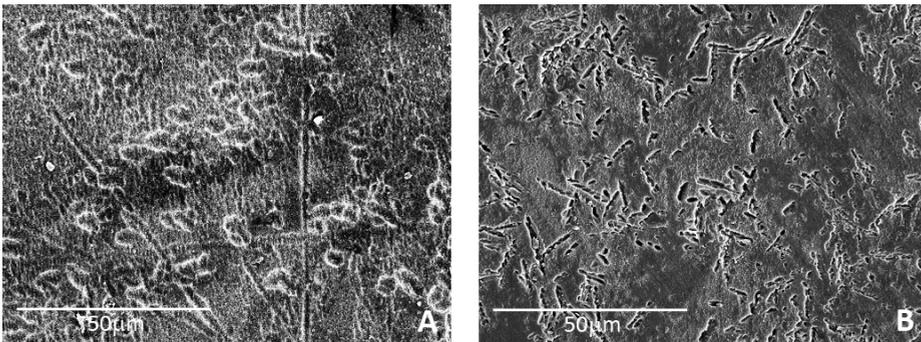


Figura 4.73 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-FCC) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% FCC; B – 50% cemento Pórtland + 50% FCC



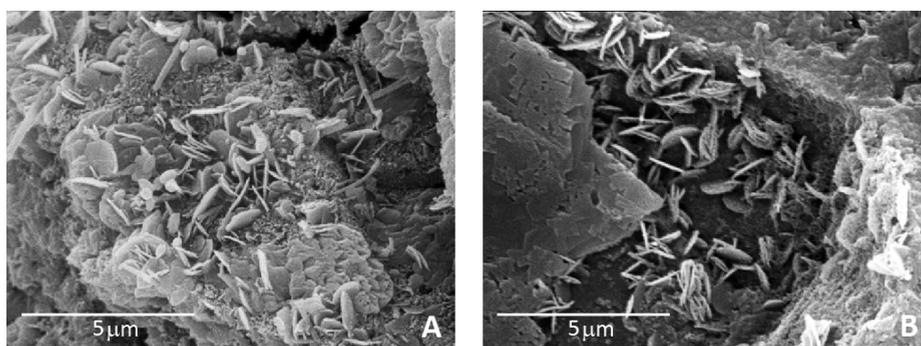
En general, la resistencia a flexotracción en morteros disminuye conforme aumenta el porcentaje de RHA adicionado o sustituido [29] por lo que estos valores son utilizados con el único fin de observar la degradación, sin afirmar que posean un buen desempeño desde el punto de vista mecánico.

Las fibras expuestas a la matriz mixta, cemento Pórtland/FCC, también presentan menor degradación al aumentar el porcentaje de puzolana, si bien con ambos porcentajes sigue siendo mayor que la presentada con RHA.

En las micrografías correspondientes al 50% de sustitución de cemento Pórtland por FCC se pueden apreciar en la superficie de ambas fibras marcas alargadas en forma dispersa que se las relaciona con la formación de cristales en la matriz.

Dada la forma de incisión que realizan, y que hasta ahora se han observado solamente con el uso de FCC, se podrían asociar estas marcas a la presencia de cristales de gelenita hidratada ( $C_2ASH_8$ ). L. Soriano [25] observó la presencia de estos cristales en las pastas con catalizadores a los 14 días de curado, y la forma de estos cristales, tanto individual como del conjunto, se podría relacionar a las marcas encontradas en el PET (Figura 4.74).

Figura 4.74 - Cristales de gelenita hidratada en morteros mixtos con FCC y MK.  
A – mortero cemento Pórtland y FCC; B – mortero cemento pórtland y MK



Asimismo se han expuesto fibras a pastas mixtas realizadas con cemento Pórtland-humo de sílice (SF) y cemento Pórtland-metacaolín (MK) con el fin de comparar prestaciones con puzolanas de origen comercial.

Ambas constituyen adiciones puzolánicas de alta reactividad y presentan en su composición química óxido de silicio en forma amorfa, y en el caso de MK, también óxido de aluminio. Se utilizaron en una proporción del 50% cemento Pórtland – 50% puzolana y se curaron 15 días en baño a 60 °C.

En las Figuras 4.75 y 4.76 se pueden observar las micrografías obtenidas de la superficie de estas fibras al estar expuestas a cada una de las pastas.

Las degradaciones observadas en estas micrografías son menores que las producidas por pastas mixtas realizadas con FCC en igual porcentaje y procedimiento de curado. Sin embargo, las pastas elaboradas con RHA presentan mayor degradación en las fibras P-NC y menor en las fibras P-C, si las comparamos con las producidas por las pastas mixtas con SF y MK.

Figura 4.75 – Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 15 días en baño 60 °C.  
A – 50% cemento Pórtland + 50% SF; B – 50% cemento Pórtland + 50% MK

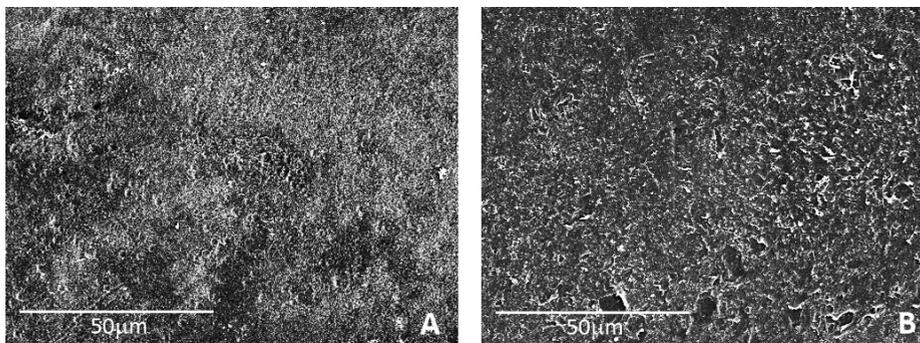
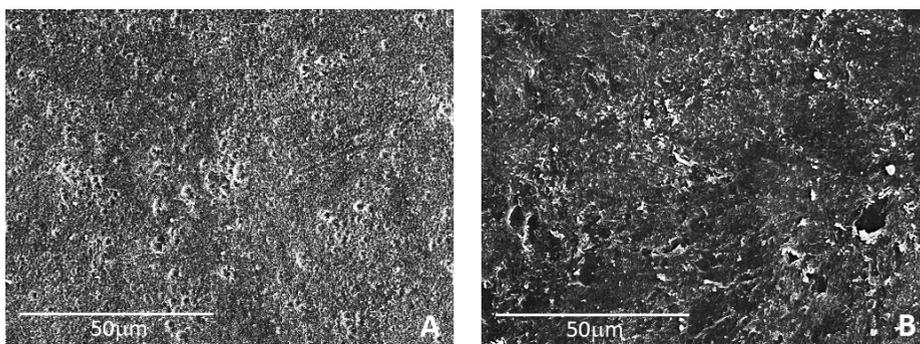


Figura 4.76 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 15 días en baño 60 °C.  
A – 50% cemento Pórtland + 50% SF; B – 50% cemento Pórtland + 50% MK



Como verificación de la incidencia de la temperatura del baño en las reacciones que se producen en estas pastas se analizaron las fibras expuestas a las mismas, con un curado de 28 días en cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °C de temperatura y  $\geq 90\%$  de humedad).

Las Figuras 4.77 y 4.78 muestran las micrografías obtenidas en esta oportunidad, pudiéndose observar que en estas condiciones de curado las pastas con MK producen mayor degradación que las pastas elaboradas con SF.

Asimismo se observa que las pastas con MK producen incisiones de similares características a las provocadas con pastas mixtas CP-FCC y curado de 15 días en baño de 60 °C.

Figura 4.77 – Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 28 días en cámara húmeda.  
A – 50% cemento Pórtland + 50% SF; B – 50% cemento Pórtland + 50% MK

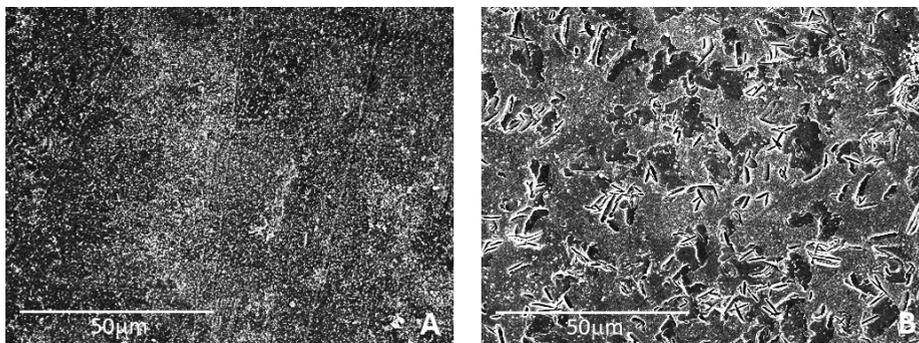
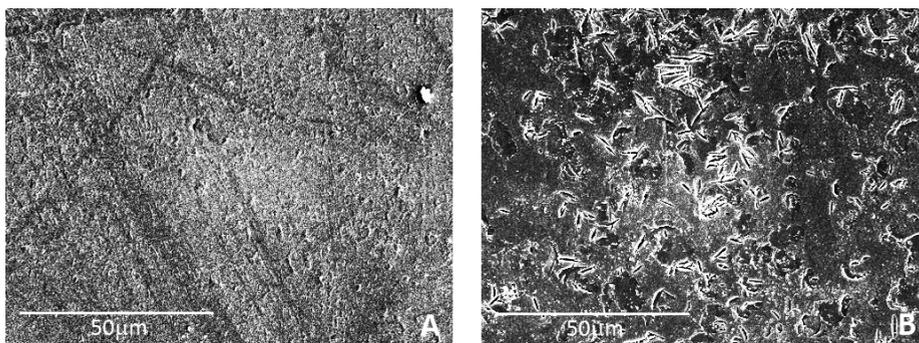


Figura 4.78 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 28 días en cámara húmeda.  
A – 50% cemento Pórtland + 50% SF; B – 50% cemento Pórtland + 50% MK



La presencia de estas marcas se podrían explicar por la presencia de iguales cristales, dado que, el metacaolín reacciona con el hidróxido cálcico liberado  $[Ca(OH)_2]$  del proceso de hidratación del cemento para formar el gel de silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, y el silicoaluminato bicálcico hidratado (gelenita hidratada) [30].

La formación de estas marcas sobre la fibra a temperaturas de 20 °C se atribuyen a la formación de gelenita hidratada; el hecho de que a 60 °C no se hubieran observado es debido a la modificación en la naturaleza de los productos de hidratación con el cambio de la temperatura de reacción. Se ha descrito [31] que a temperatura de 60 °C y superiores el producto formado por reacción puzolánica del metacaolín es el hidrogarnet ( $C_3AH_6$ ), cuya morfología es completamente diferente. Los cristales de

hidrogarnet aparecen con una morfología redondeada [32, 33] a diferencia de la forma laminar de la gelenita hidratada [34].

### Procedimiento de curado

Según lo observado, en las pastas mixtas CP-SF y CP-MK, la formación de cristales en la matriz, y que se incrustan en las fibras, se ve afectada por la temperatura de curado, por la aceleración que ésta produce en las reacciones químicas del proceso de hidratación del cemento.

En vista de ello se ha realizado el análisis de fibras expuestas a matriz mixta 80% CP – 20% RHA y 80% CP – 20% FCC con una temperatura de baño menor (45 °C) para verificar si la temperatura de 60 °C empleada favorece al impedir la incrustación de cristales.

Las micrografías obtenidas, de fibras P-NC sometidas a ambos procedimientos, 45 °C y 60°C de curado, se exponen en las Figuras 4.79 y 4.80.

Se observa que la exposición a una temperatura mayor, con un 20% de sustitución de cemento Pórtland por puzolana, se produce una degradación superficial más homogénea, y en el caso de FCC sin la presencia de tantas incrustaciones.

La textura superficial de las fibras tiene características diferentes según la temperatura pero no desaparece lo que reafirma la hipótesis de que el hidróxido cálcico no es el único factor.

Figura 4.79 – Fibras P-NC en matrices mixtas 80%C+20%RHA comparación curado en baño.  
A – curado 15 días en baño 45 °C; B – curado 15 días en baño 60 °C

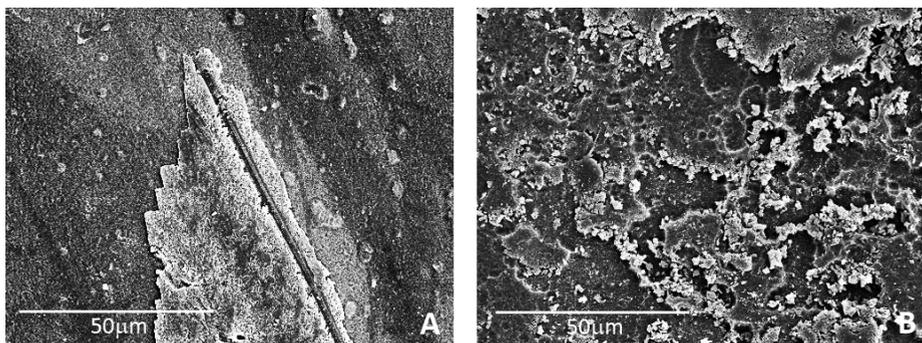
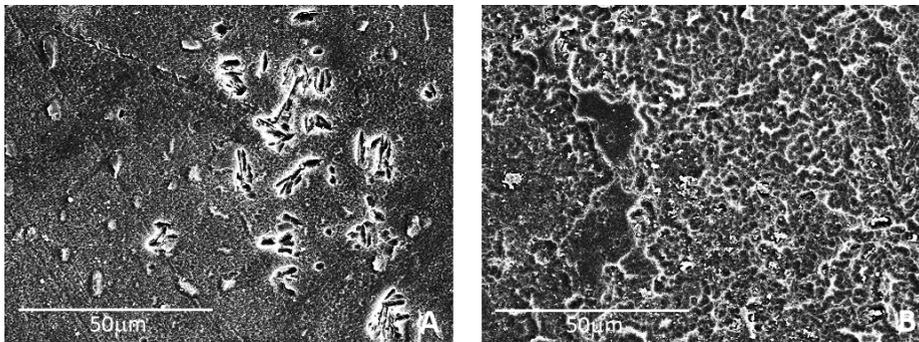


Figura 4.80 – Fibras P-NC en matrices mixtas 80%C+20%FCC comparación curado en baño.  
A – curado 15 días en baño 45 °C; B – curado 15 días en baño 60 °C



En las Figuras 4.81 y 4.82 se exponen las micrografías obtenidas en fibras expuestas a estas pastas, curadas en baño y cámara, donde se pueden apreciar, a mayor número de aumentos, las diferencias que produce la temperatura en la degradación.

Figura 4.81 – Fibra P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% RHA comparación curados.  
A – curado 28 días en cámara húmeda; B – curado 15 días en baño 45 °C; C – curado 15 días en baño 60 °C

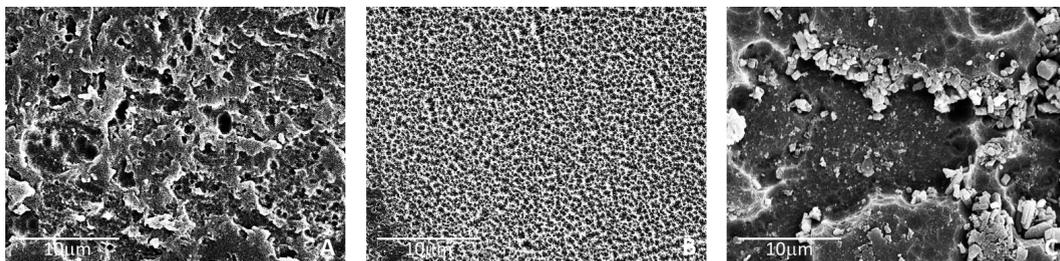
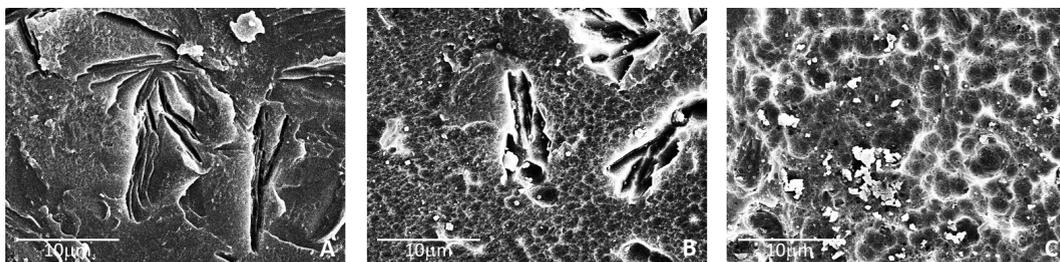


Figura 4.82 – Fibra P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% FCC comparación curados.  
A - curado 28 días en cámara húmeda; B - curado 15 días en baño 45 °C; C - curado 15 días en baño 60 °C



La textura presente en cada procedimiento de curado no se corresponde en ambas pastas. Con el empleo de RHA y una exposición a 45 °C se presenta como micro poros frente a las oquedades producidas en los curados 28 días en cámara y 15 días en baño a 60 °C.

Sin embargo, en las fibras que estuvieron expuestas a la pasta mixta con FCC se aprecia que las incisiones producidas por los cristales disminuyen su tamaño a medida que aumentamos la temperatura al punto de ser imperceptibles con el curado a 60 °C.

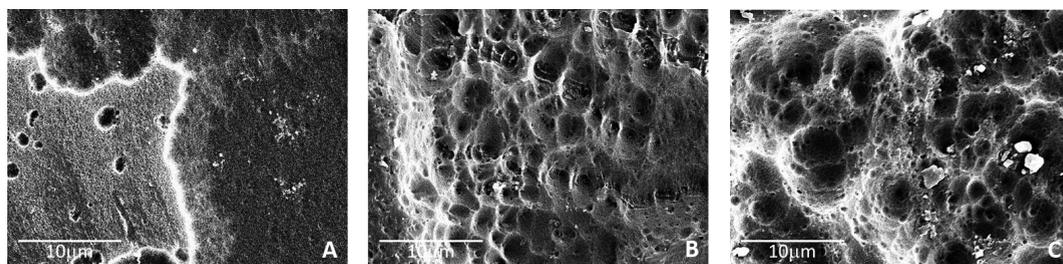
### Matriz de cemento Pórtland

En este punto se muestran los resultados del estudio de las fibras P-NC expuestas a una matriz de cemento Pórtland a distintas edades, conservadas en condiciones de cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °C de temperatura y  $\geq 90\%$  de humedad). En la Figura 4.83 se muestran las micrografías obtenidas.

Se puede observar que la degradación, en fibras inmersas en pastas de cemento Pórtland, sigue avanzando con el tiempo. De la ligera textura presentada a los 28 días se transforma en oquedades que se amplían con la edad.

Figura 4.83 – Fibra P-NC en una matriz de cemento Pórtland a distintas edades.

A – 28 días en cámara húmeda; B – 240 días en cámara húmeda; C – 365 días en cámara húmeda.



#### 4.2.2.2 Análisis de la evolución de la resistencia a tracción de fibras P-NC inmersas en matriz cementicia

Para analizar esta evolución se ha seguido el procedimiento basado en las Normas ASTM C 1560-03 [35] y UNE-EN 14649:2006 [36].

Se ha ensayado a tracción fibras de P-NC inmersas en pasta de cemento Pórtland, relación agua/cemento 0,5, curadas a distintas edades y condiciones de temperatura determinando el valor medio de resistencia máxima ( $\sigma_{Tm\acute{a}x}$ ), límite elástico ( $\sigma_{LE}$ ) y módulo elástico ( $E_T$ ) en cada caso.

Los tipos de curado fueron: 28 días en cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °C de temperatura y  $\geq 90\%$  de humedad), y 28 días en cámara húmeda más 5, 10, 15, 20, 30 y 35 días posteriores en baño a 45 °C, de acuerdo con la Norma ASTM mencionada.

En las Figuras 4.84 y 4.85 se representan los valores de resistencia a tracción y módulo elástico obtenidos, analizando la evolución de las propiedades mecánicas cuando las fibras estuvieron sometidas al proceso de envejecimiento controlado.

Tomando como criterio el indicado en la Norma ASTM mencionada, se debería considerar que el envejecimiento ha llegado a su fin en las muestras que estuvieron expuestas 20 días al baño de 45 °C por tener una disminución en la capacidad de deformación mayor al 10% con las fibras expuestas 10 días al baño (mitad del tiempo de exposición). Considerando que:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

donde

$\varepsilon$  es deformación

$\sigma$  es tensión

$E$  es módulo elástico

Esta disminución de la capacidad de deformación la podemos determinar a través del incremento del módulo elástico, donde:

$$\frac{E_{20db}}{E_{10db}} = \frac{1,82 \text{ GPa}}{1,54 \text{ GPa}} = 1,18 \Rightarrow 18\% > 10\%$$

Sin embargo, el valor de resistencia a tracción alcanzado a la edad de 20 días es de 118 MPa, 10,3% mayor que el valor de la fibra virgen y 3,3% menor que la tensión de la fibra expuesta 28 días en la cámara húmeda.

Figura 4.84 - Resistencia a tracción de fibras de P-NC.

$\sigma_{T\text{máx}}$  = tensión máxima;  $\sigma_{LE}$  = tensión del límite elástico; dc= días en cámara; db=días en baño

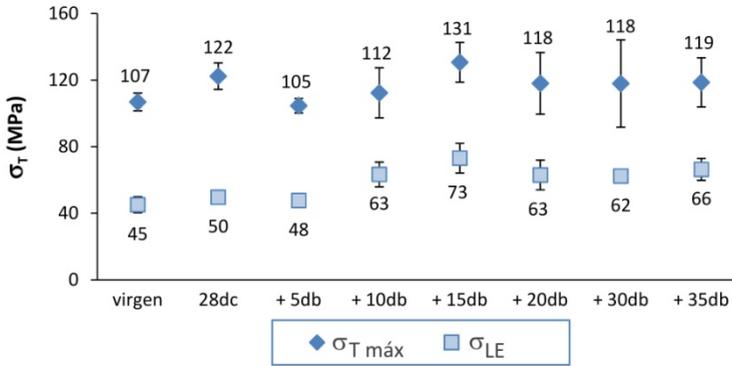
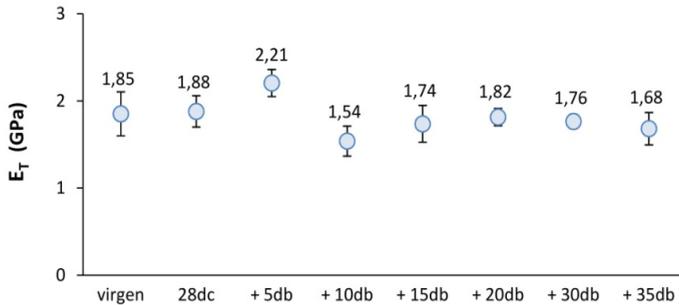


Figura 4.85 - Módulo elástico a tracción de fibras P-NC.

dc= días en cámara; db= días en baño



Asimismo, si observamos este resultado y el obtenido de fibras expuestas a igual matriz durante 14 meses, vemos que la tensión que estaría tomando como fin del envejecimiento es un 51% mayor a la que se obtiene a los 14 meses, sin estar expuesto a baño ( $118 \text{ GPa} / 78 \text{ GPa} = 1,51$ ).

Estos valores se han complementado con los obtenidos de muestras que se conservaron en la cámara húmeda ( $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura y humedad  $\geq 90\%$ ) durante 14 meses desde el momento de su elaboración. En las Figuras 4.86 y 4.87 se muestran los resultados obtenidos comparándolos con los correspondientes a la fibra virgen y a las fibras expuestas durante 28 días en cámara húmeda.

Figura 4.86 -Resistencia a tracción de fibras de P-NC expuestas 14 meses a matriz cementicia.  $\sigma_{T\text{ máx}}$ = tensión máxima;  $\sigma_{LE}$ = tensión del límite elástico; dc= días en cámara; m= meses

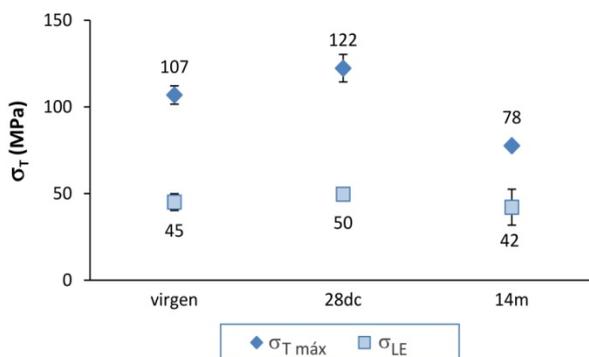
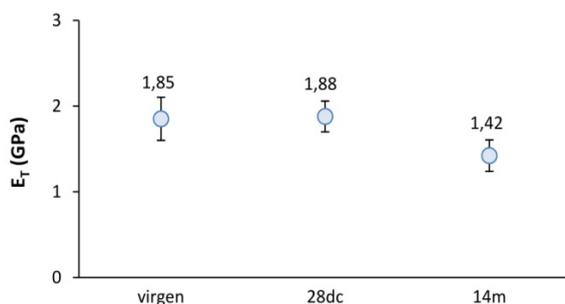


Figura 4.87 -Módulo elástico a tracción de fibras P-NC expuestas 14 meses a matriz cementicia. dc= días en cámara; m= meses



En general se puede apreciar que los valores, tanto de tensión como módulo elástico, se incrementan en los primeros 28 días de curado, para luego disminuir con el envejecimiento hasta 14 meses.

Finalmente, se determinaron los valores de resistencia mecánica de fibras de fibras que luego de estar expuestas los 35 días a los 45 °C del baño, se conservaron en el ambiente de la cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °C de temperatura y humedad  $\geq 90\%$ ) hasta una edad total de 14 meses. Los valores obtenidos se han comparado con las fibras de igual edad pero que no estuvieron expuestas al baño, así como con la expuesta durante 20 días cuyos valores de resistencia, teóricamente, serían los correspondientes al final del envejecimiento.

Para tener una visión global de la situación, en las Figuras 4.88 y,4.89 además de los valores mencionados también se grafican los correspondientes a fibras vírgenes y a las curadas 28 días en ambiente de cámara húmeda.

Figura 4.88 - Resistencia máxima a tracción ( $\sigma_{T\text{máx}}$ ) fibras inmersas en una matriz cementicia con edades entre 28 días y 14 meses.  
dc= días en cámara; db= días en baño; m= meses

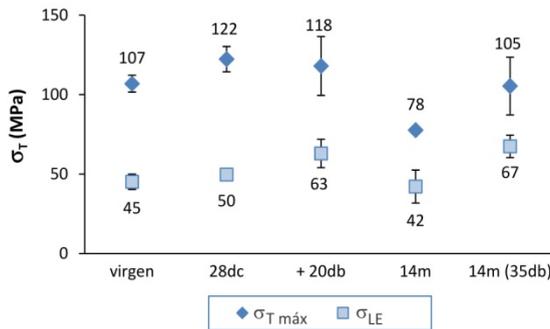
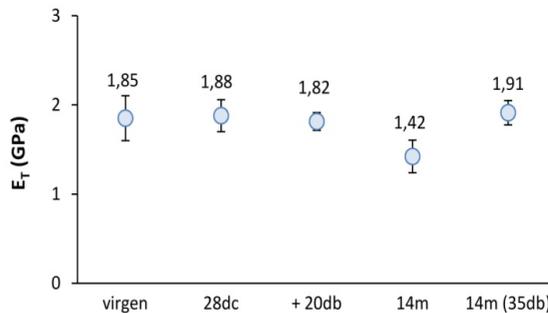


Figura 4.89 - Módulo elástico a tracción ( $E_T$ ) de fibras inmersas en matriz cementicia con edades entre 28 días y 14 meses.  
dc= días en cámara; db= días en baño; m= meses



Se puede observar que la exposición de esos 35 días intermedios a 45 °C hace que la resistencia aumente un 36% respecto a la obtenida en las fibras que estuvieron esos 14 meses sólo en cámara húmeda y ambas son inferiores a los 118 MPa del límite de envejecimiento que se tomaría siguiendo el criterio de la norma ASTM C1560-03.

Por otra parte, se puede apreciar que la dispersión de resultados en las muestras que fueron curadas en el baño a 45 °C es mayor, incluso superando valores admisibles del 10%.

Igual tendencia se encuentra en el módulo elástico. La degradación produce que las fibras se vuelvan más elásticas, con un valor menor de módulo, a los 14 meses si el curado se realiza solamente en cámara.

Sin embargo, los 35 días de exposición a 45 °C las convierte en menos elásticas, con un aumento del 34,5% respecto a las fibras de igual edad curadas solo en cámara, y un 3% respecto al módulo de la fibra virgen.

Estos incrementos podrían relacionarse con cambios del material polimérico al estar expuesto a temperatura y distintas velocidades de reacción entre los productos de hidratación del cemento Pórtland.

Tanto el aumento de resistencia como del módulo elástico nos lleva a pensar que puede existir una modificación en la parte amorfa de su composición, tanto sea por una fijación de las partes libres o por su transformación a cristalina [4].

También es probable que el desarrollo de productos de hidratación en la interfase fibra-matriz afecte de diferente manera cuando se cambian las condiciones de curado, de modo que envejecimientos acelerados no producen daños importantes como cabía esperar inicialmente.

#### 4.2.2.3 Estudio, por Análisis Termogravimétrico (TG), de matrices cementicias.

La reacción del cemento Pórtland con agua, mediante una serie de procesos, da como resultado productos de hidratación y libera portlandita. Esta portlandita liberada, en presencia de materiales puzolánicos activos puede dar lugar a la formación de nuevos productos de hidratación, similares a los formados en la hidratación del cemento.

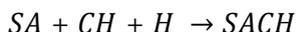
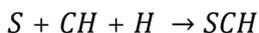
Con el fin de conocer el porcentaje de hidróxido cálcico presente en las pastas se utilizó la técnica de la termogravimetría y el análisis térmico diferencial.

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 µL sellable con orificio en la tapa para atmósfera autogenerada.
- ✓ Atmósfera inerte de N<sub>2</sub>
- ✓ Flujo de N<sub>2</sub> de 75 mL/min

Se eligió dicho intervalo de temperaturas debido a que los procesos de deshidratación de los hidratos formados, así como de deshidroxilación del hidróxido cálcico (CH) que queda disponible, se encuentran en él.

Asimismo, en las pastas mixtas las puzolanas al combinarse con el CH libre del proceso de hidratación del cemento (portlandita), en presencia de agua, pueden dar las siguientes reacciones:



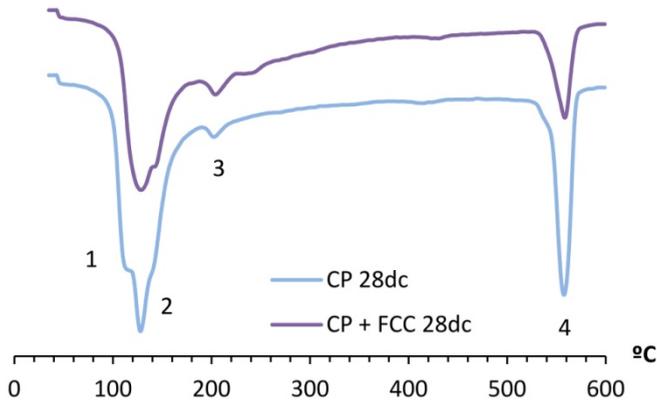
donde S, CH, A, SA, H es la nomenclatura de sílice, portlandita, alúmina, silico-alúmina y agua respectivamente, y SCH, ACH y SACH es la nomenclatura de silicato cálcico hidratado, aluminato cálcico hidratado y silicoaluminato cálcico hidratado, respectivamente.

Observando la curva DTG nos permite identificar dichos procesos. En la Figura 4.90 se representan, a manera de ejemplo, las curvas DTG de una pasta de cemento Pórtland y de una pasta mixta, con un 20% de FCC, curadas 28 días en cámara húmeda y sobre ellas se indican los principales procesos de pérdida de masa.

Podemos diferenciar los picos de la siguiente manera: el pico 1 corresponde a la deshidratación de la etringita (100-180 °C), solapado con el pico 2 correspondiente a la deshidratación de la fase SCH; pico 3 para las deshidrataciones de SACH-ACH (180-240

°C). Pueden existir compuestos que se deshidraten en la zona de 240-300 °C, pero la pérdida continua seguramente se solapa con este proceso.

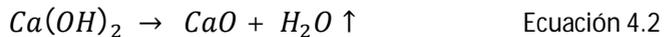
Figura 4.90 – Curva DTG con principales procesos de pérdida de masa en pasta cementicia y pasta mixta.



La pérdida de masa que tiene lugar en el intervalo de temperatura 520-600 °C (pico 4) es la correspondiente a la deshidroxilación del CH, integrando ese pico podemos conocer la cantidad de hidróxido cálcico que queda en la pasta estudiada. En las pastas mixtas corresponde al porcentaje que no ha reaccionado con la puzolana.

A partir de los datos extraídos de estas curvas se pueden determinar tanto la cantidad de cal presente en las muestras como el porcentaje fijado por la puzolana, cuando corresponda, según el siguiente proceso:

La deshidroxilación del CH responde a la reacción:



Esta deshidroxilación se puede calcular teniendo en cuenta trabajos anteriores [37] y en base a los datos de pérdida de peso producida en el intervalo de temperaturas entre 500 °C y 600 °C para cada una de las muestras. Por tanto, la cantidad de agua combinada con los productos de reacción (sin tener en cuenta la que se encuentra en la portlandita), el porcentaje de portlandita, así como el hidróxido cálcico consumido por la reacción puzolánica, cuando corresponde, fueron calculados de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\% H_2O \text{ combinada} = P_T - P_{CH} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$\% CH \text{ presente} = P_{CH} \cdot \left( \frac{PM_{CH}}{PM_{H_2O}} \right) \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$$\% \text{Portlandita consumida} = \left( \frac{(CH_c \cdot C) - CH_p}{CH_c \cdot C} \right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 4.5}$$

donde  $P_T$  es la pérdida de masa total obtenida por el calentamiento a temperaturas entre 35 °C y 600 °C después de un tiempo de curado "t";  $P_{CH}$  es la pérdida de masa relacionada con la deshidratación de la portlandita ocurrida a temperaturas entre 500 °C y 600 °C después de el mismo tiempo de curado;  $PM_{CH}$  y  $PM_{H_2O}$  son los pesos moleculares de la portlandita y agua respectivamente;  $CH_c$  es el contenido de portlandita en la pasta control, de cemento Pórtland en este caso;  $CH_p$  es el contenido de portlandita en la pasta a evaluar, con adición de puzolanas; y C es la proporción de cemento en el conglomerante de la pasta mixta en tanto por uno.

En base a estos conceptos se ha realizado el estudio de pastas correspondientes a las situaciones de degradación observadas en los puntos 4.1.4. y 4.2.2.1. y en las elaboradas especialmente para este fin.

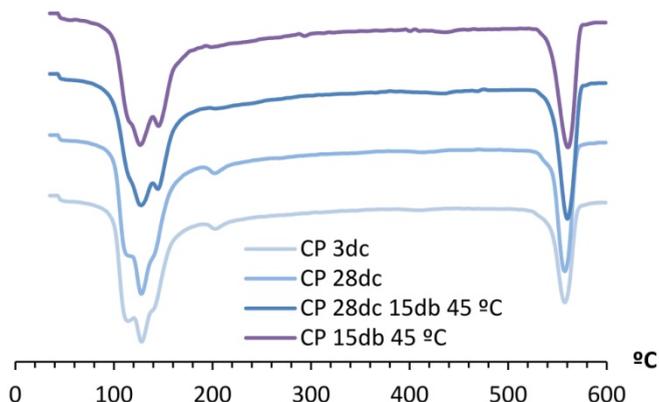
### Pasta cementicia según curado

Se estudiaron las distintas pastas de cemento Pórtland empleadas en el estudio de degradación de fibras con la finalidad de comparar el contenido de portlandita en cada una de ellas con el grado de agresión observado en las micrografías.

En la Figura 4.91 se exponen las curvas DTG obtenidas de las siguientes edades de pastas de cemento Pórtland con relación agua/cemento 0,5:

- 3 días de curado en cámara húmeda
- 28 días de curado en cámara húmeda
- 28 días de curado en cámara húmeda y 15 días en baño de 45 °C
- 15 días en baño de 45 °C

Figura 4.91 - DTG de pastas de cemento Pórtland a distintas edades de curado.  
dc = días de curado en cámara húmeda; db= días de curado en baño



En estas curvas se puede observar que no existen diferencias entre las edades de 3 y 28 días curadas en cámara.

Asimismo se produce una disminución en el mínimo de la función correspondiente a la deshidratación de los silicoaluminatos entre los 180 °C y 240 °C en las muestras que tuvieron procesos de curado a temperatura de 45 °C.

En la Tabla 4.9 se presentan los valores de porcentaje de agua combinada e hidróxido cálcico presente en cada una de las pastas.

Tabla 4.9 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland a distintas edades y procedimientos de curado.

dc = días de curado en cámara húmeda; db= días de curado en baño

muestra	% H <sub>2</sub> O combinada	% CH presente
CP 3dc	17,37	10,8
CP 28dc	19,44	12,9
CP 28dc 15db 45 °C	19,57	15,0
CP 15db 45 °C	18,94	14,5

Se puede observar los porcentajes de cal presente en las muestras curadas 28 días en cámara, 28 días en cámara más 15 días en baño, y 15 días en baño solamente, son similares siendo su máxima variación un 2,1%. Principalmente, existe una mínima diferencia, 0,5%, entre las pastas curadas 28 días en cámara húmeda y 15 días en baño, con las que se curaron directamente 15 días en baño a 45 °C.

### Pasta cementicia en contacto con P-NC

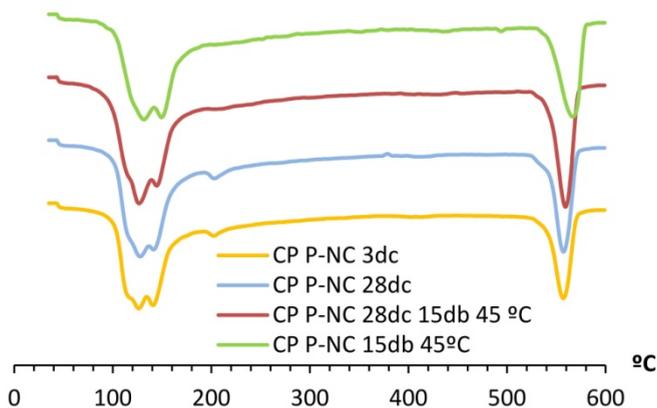
Bajo la hipótesis de que la portlandita reacciona con el polímero en el proceso de degradación, se analizaron las pastas cementicias provenientes de las muestras utilizadas en la observación de fibras mediante SEM.

En la Figura 4.92 se exponen las curvas DTG obtenidas de las siguientes edades de pastas de cemento Pórtland con relación agua/cemento 0,5 y provenientes de las muestras de fibras provenientes de envases post-consumo de bebidas no carbonatadas, P-NC:

- 3 días de curado en cámara húmeda
- 28 días de curado en cámara húmeda
- 28 días de curado en cámara húmeda y 15 días en baño de 45 °C
- 15 días en baño de 45 °C

Figura 4.92 - DTG de pastas de cemento Pórtland en contacto con fibras P-NC a distintas edades de curado.

dc = días de curado en cámara húmeda; db= días de curado en baño



Se puede realizar la misma observación respecto a la deshidratación de los silicoaluminatos cálcicos hidratados entre los 180 °C y 240 °C, en las pastas curadas en baño de 45 °C el pico correspondiente disminuye.

Los porcentajes de agua combinada y porlandita presente en estas muestras se resumen en la Tabla 4.10. Se observa que los porcentajes en esta situación presentan pequeñas diferencias con la pasta control de cemento Pórtland, menores a un 1%, por lo que se puede considerar despreciables.

Tabla 4.10 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland en contacto con fibras P-NC a distintas edades y procedimientos de curado.  
dc = días de curado en cámara húmeda; db= días de curado en baño

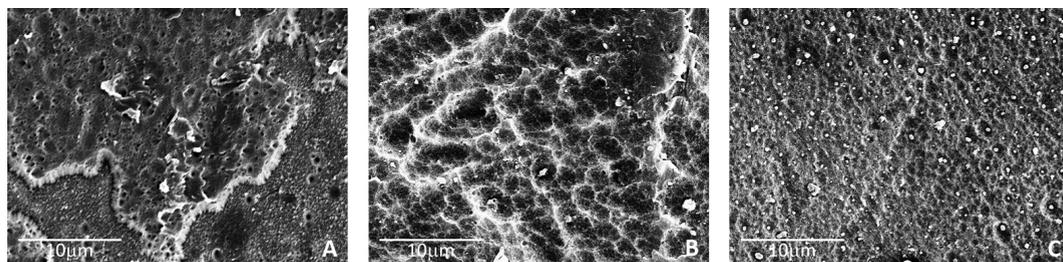
<b>muestra</b>	<b>% H<sub>2</sub>O combinada</b>	<b>% CH presente</b>
<b>CP P-NC 3dc</b>	15,97	10,6
<b>CP P-NC 28dc</b>	18,55	12,5
<b>CP P-NC 28dc 15db 45 °C</b>	19,87	14,4
<b>CP P-NC 15db 45 °C</b>	18,18	13,7

Si comparamos los valores obtenidos con las distintas formas de curado, especialmente los que refieren a 28 días en cámara, 28 días en cámara más 15 días en baño y solamente 15 días en baño observamos que entre los dos primeros existe una diferencia de 1,9%, y entre los dos últimos de un 0,7%, siendo mayor en aquellas muestras que estuvieron en cámara húmeda antes del baño.

Estas diferencias de valores parecen no corresponder con el grado de degradación observado mediante SEM en las fibras expuestas a estas matrices (Figura 4.93) principalmente en lo que refiere a las muestras expuestas a temperatura de baño durante su curado.

En estas micrografías se observa que, pese a que la diferencia de portlandita presente es menor al 1%, la degradación en la Figura 4.93 B es mucho mayor que la existente en la Figura 4.93 C.

Figura 4.93 - Fibras P-NC expuestas a una matriz de cemento Pórtland con distintos curados.  
A - 28 días en cámara húmeda; B - 28 días en cámara húmeda y 15 días en baño 45 °C;  
C - 15 días en baño 45 °C



Siendo los primeros 28 días en cámara húmeda la diferencia de curado entre ambas situaciones, la explicación podría estar dada por un mayor tiempo de exposición a la matriz cementicia en la primera situación (B), frente a una mayor aceleración en las reacciones de hidratación en la segunda, que minimizan la degradación.

Igual razonamiento se puede realizar respecto al curado sólo en cámara y en cámara y baño, o sea entre las Figuras 4.93 A y 4.93 B, donde existe menos de un 2% de diferencia en el porcentaje de CH presente, lo que reafirma la idea de que este componente no es la única variable relacionada con la degradación existente.

En base a estos resultados, y entendiendo que la muestra de pasta utilizada puede ser excesiva frente al espesor de la interfaz que interacciona con el PET, se analizaron mediante esta técnica muestras de pastas de cemento Pórtland, de iguales características que las anteriores, elaboradas especialmente con los moldes mencionados en el punto 3.3.3.2.

Las pastas obtenidas tienen un espesor de 2,5 mm y se encuentran en contacto con PET en ambas caras.

Las curvas DTG obtenidas de ambas muestras, en contacto con la fibra P-NC y control, curadas en cámara húmeda durante 28 días, se representan en la Figura 4.94 donde no se aprecian diferencias entre ambas.

Los porcentajes de porlandita presente, así como el porcentaje de agua combinada, en la pasta control y la que estuvo en contacto con el PET, se resumen en la Tabla 4.11. Se

observa que los porcentajes en esta situación presentan una diferencia de 0,5%, no relacionándose nuevamente con la degradación observada en las fibras.

Figura 4.94 - DTG de pastas de cemento Pórtland, 2,5 mm de espesor, en contacto con P-NC.  
dc = días de curado en cámara húmeda

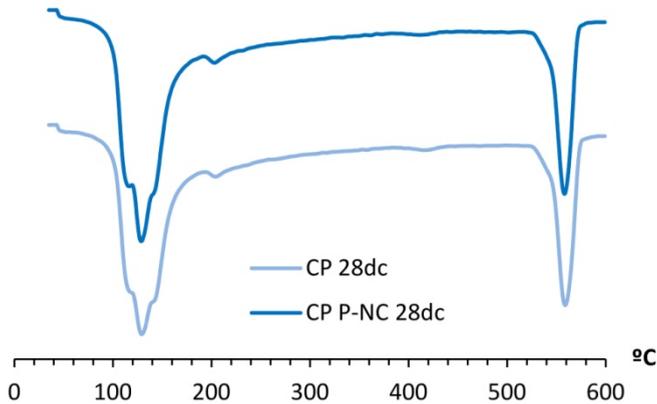


Tabla 4.11 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland, espesor 2,5 mm, en contacto con fibras P-NC.  
dc = días de curado en cámara húmeda

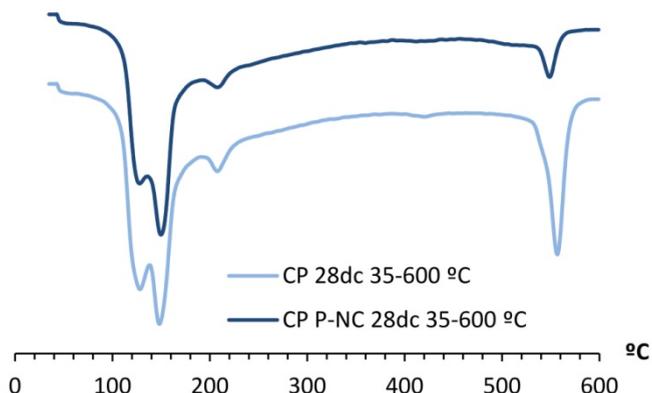
muestra	% H <sub>2</sub> O combinada	% CH presente
CP 28dc e=2,5mm	19,53	13,8
CP P-NC 28dc e=2,5mm	20,00	13,3

Como medida de disminuir el espesor de la pasta analizada, se realizó un nuevo intento cubriendo con una fina capa, realizada con pasta de cemento Pórtland, relación agua/cemento 0,5, ambas caras de piezas de P-NC, de 1,5 cm x 3,0 cm, curadas 28 días en cámara húmeda.

La representación de las curvas DTG de estas pastas (Figura 4.95) muestra que existe una variación importante en el pico correspondiente a la deshidroxilación del CH, en el intervalo de temperatura 520-600 °C.

Figura 4.95 - DTG de pastas de cemento Pórtland, película fina, en contacto con piezas de P-NC.  
35-600 °C.

dc = días de curado en cámara húmeda



Esta diferencia se confirma en los porcentajes de portlandita presente, expresados en la Tabla 4.12, que muestran una variación de 6,2%.

Tabla 4.12 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland, película fina, en contacto con piezas de P-NC.  
dc = días de curado en cámara húmeda

muestra	% H <sub>2</sub> O combinada	% CH presente
CP 28dc capa fina	17,10	8,2
CP P-NC 28dc capa fina	14,35	2,0

Este resultado podría sugerir que existe influencia por parte de la fibra en la hidratación del cemento. Como procedimiento de confirmación de que los resultados obtenidos no son producto de la carbonatación de las muestras, se realizó el ensayo cambiando las condiciones del mismo.

Puesto que las pérdidas correspondientes al CO<sub>2</sub> por parte de los carbonatos se encuentran a temperaturas mayores de 600 °C, en esta oportunidad, las condiciones utilizadas para el análisis 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 µL

En la representación de las curvas DTG para las mismas pastas (Figura 4.96) se observa que existen pérdidas importantes por carbonatación en ambas muestras, impidiendo validar la afirmación sobre la influencia de la fibra en la hidratación del cemento.

Por último, retomando las condiciones de ensayo iniciales, se realizó una nueva tentativa colocando una fina capa de pasta cementicia de iguales características entre dos piezas de P-NC de mayor tamaño (Figura 4.97).

Figura 4.96 - DTG de pastas de cemento Pórtland, película fina, en contacto con piezas de P-NC, 35-1000 °C.  
dc = días de curado en cámara húmeda

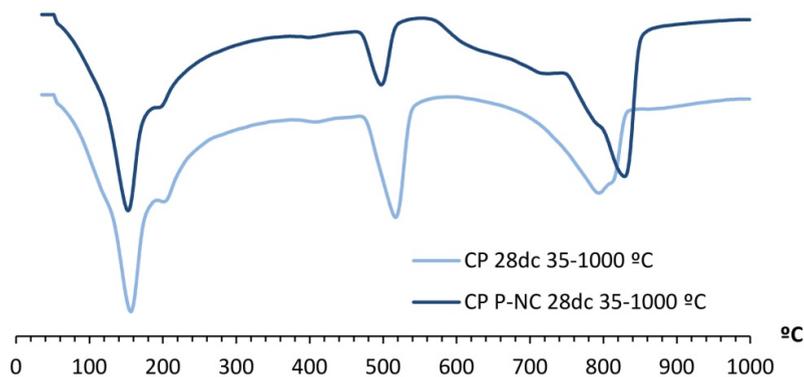
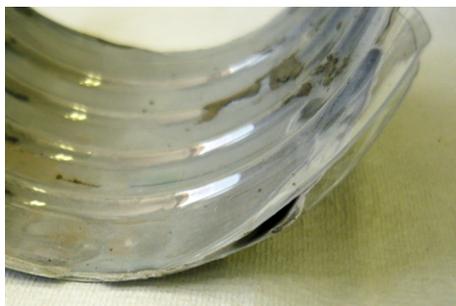


Figura 4.97 - Pasta de cemento Pórtland entre piezas de P-NC



Para la elaboración de la muestra control se ha empleado dos placas, de dimensiones similares a las de PET, de polimetilmetacrilato (PMMA), que es inerte en contacto con el cemento.

De las muestras obtenidas se descartó la zona perimetral, de 1,0 cm de ancho aproximadamente, por su exposición al dióxido de carbono del aire en el espesor externo de la película, garantizando que la muestra analizada no ha estado en contacto con el mismo.

En la Figura 4.98 se representan las curvas DTG obtenidas donde se observan diferencias mínimas entre ellas, que no nos permiten establecer su relación con el proceso de degradación y que se confirma con la diferencia en los porcentajes de portlandita presente, 0,5%, expresados en la Tabla 4.13.

Figura 4.98 - DTG de pastas de cemento Pórtland en contacto con PMMA y P-NC  
dc = días de curado en cámara húmeda

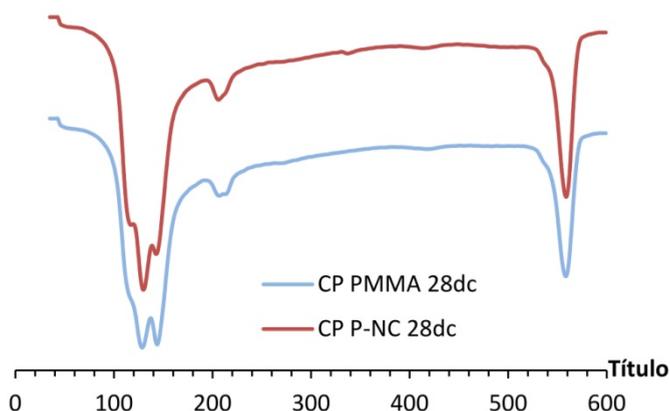


Tabla 4.13 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento, en contacto con PMMA y P-NC.  
dc = días de curado en cámara húmeda

muestra	% H <sub>2</sub> O combinada	% CH presente
CP PMMA 28dc	16,92	8,0
CP P-NC 28dc	18,07	8,5

Opuesto a las hipótesis de partida, la menor presencia de CH se da en la muestra patrón, elaborada entre placas de metacrilato, lo que reafirma la creencia de que el hidróxido de calcio no es el único producto de hidratación del cemento responsable de la degradación de las fibras, y que aparentemente no existe un consumo importante de portlandita en ese proceso de degradación.

### Pastas mixtas

Finalmente, para determinar el porcentaje de portlandita presente y de fijación de cal de cada una de las puzolanas estudiadas se realizó el análisis termogravimétrico a pastas mixtas empleadas en los estudios de degradación de las fibras P-NC.

Las pastas utilizadas fueron las elaboradas con 50% de cemento Pórtland - 50% de puzolana y curadas 15 días en el baño a 45 °C. Las adiciones empleadas fueron RHA, FCC, SF y MK, y los porcentajes obtenidos se compararon con los de una muestra control realizada 100% cemento Pórtland.

En la Figura 4.99 se representan las curvas DTG de las pastas estudiadas donde se puede observar que con estas proporciones de cemento Pórtland/puzolana el porcentaje de fijación de cal está próximo al 100%, lo que se confirma con los valores calculados y resumidos en la Tabla 4.14.

Figura 4.99 - DTG de pastas mixtas, curadas 15 días en baño 45 °C.  
db= días de curado en baño

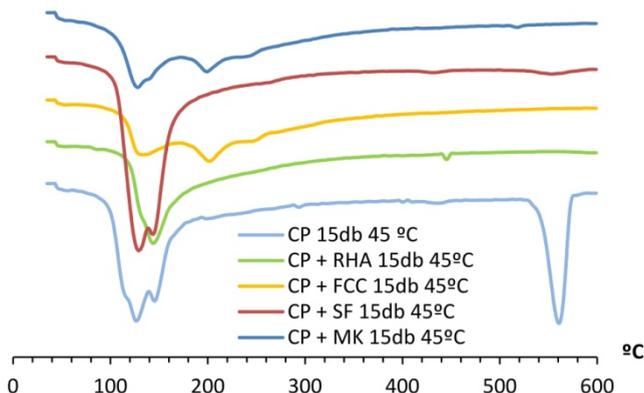


Tabla 4.14 - Porcentajes de agua combinada, CH presente y cal fijada en pastas mixtas con 50% de sustitución, curadas 15 días en baño a 45 °C.  
db= días de curado en baño

muestra	% H <sub>2</sub> O combinada	% CH presente	% CH fijado
CP 15db	18,94	14,5	-----
CP + RHA 15db	14,25	0,00	100
CP + FCC 15db	14,52	0,00	100
CP + SF 15db	20,60	0,61	99,62
CP + MK 15db	14,97	0,00	100

Asimismo se observa que para las puzolanas silíceas, (SF y RHA) apenas se identifican los picos correspondientes a las deshidrataciones de aluminatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados (punto 3 en la Figura 4.90); mientras, para las puzolanas silicoaluminosas (FCC y MK) ese pico está mucho más desarrollado.

Se puede apreciar una correspondencia en la presencia de estos compuestos que explican la similitud de degradación que producen en las fibras P-NC.

### 4.2.3 Interfaz

#### 4.2.3.1 Estudio mediante Microanálisis por EDS.

Para realizar el microanálisis de la interfaz matriz de cemento Pórtland/fibras P-NC (fibras de envases post-consumo de bebidas no carbonatadas), se utilizó el detector de rayos X (EDS) que posee el microscopio electrónico de barrido (SEM).

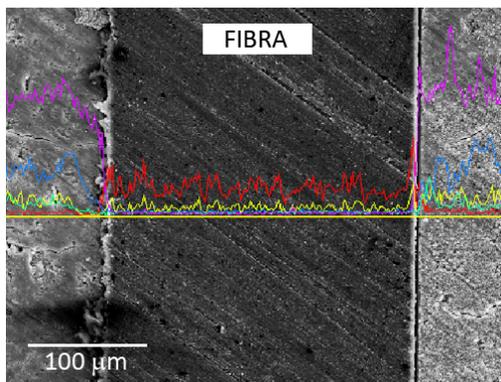
Este detector recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones y como la energía de cada radiación X es característica de cada elemento, podemos obtener información semi-cuantitativa por áreas, del tamaño que deseemos, de la superficie analizada.

Se optó por designar como figura de análisis una línea perpendicular a la interfaz para visualizar la variación de los elementos químicos a ambos lados de la misma.

En primera instancia se utilizaron las muestras elaboradas con los moldes descritos en el punto 3.3.4, curadas 28 días en cámara húmeda y posteriormente embutidas en una resina epoxídica. Para su análisis fueron pulidas, para obtener una superficie sin rugosidades, y recubiertas con una película de oro con el objetivo de asegurar la conductividad de las mismas, según procedimiento expuesto en el punto 3.3.4.

En la Figura 4.100 se expone la micrografía de un sector donde se observa el espectro de los elementos encontrados sobre la línea trazada que abarca matriz/fibra/matriz (espectro obtenido por acumulación de los fotones emitidos durante 240 segundos). Los espectros de distribución de los elementos principales se exponen individualmente en la Figura 4.101.

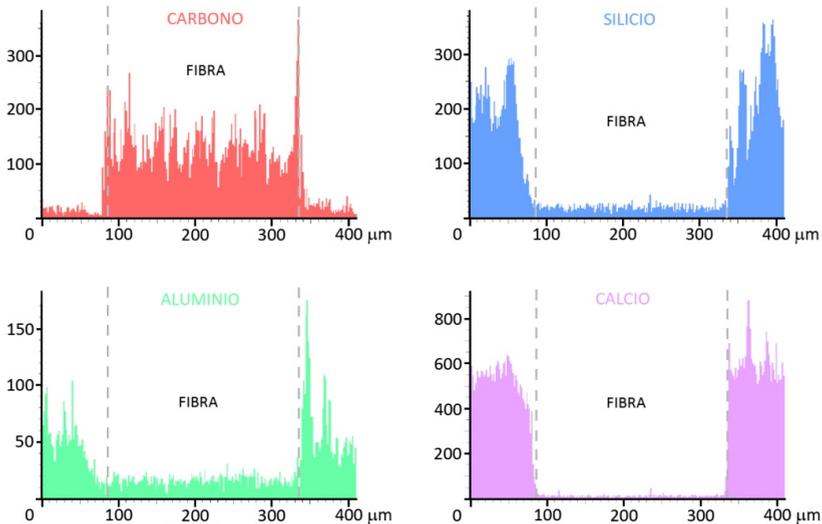
Figura 4.100 - Micrografía y microanálisis por EDS de interfaces matriz/fibra/matriz en compuesto con matriz de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC)  
(los elementos a los que corresponden los espectros EDS se encuentran en la Figura 4.101)



Si bien este análisis no es cuantitativo, por depender del tiempo de exposición de la muestra al haz de electrones, nos permite hacer un análisis comparativo entre los elementos encontrados.

Se observa que los elementos principales de la matriz que encuentran en contacto con la fibra son calcio, silicio y aluminio, lo cual permite asociarlos a la presencia de portlandita y silicatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados.

Figura 4.101 - Espectros de los principales elementos detectados por microanálisis EDS en interfaces de compuesto con matriz de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC).



Principalmente en la interfaz derecha se aprecia en el espectro del aluminio un incremento hacia esta superficie y una disminución de silicio.

En esta imagen se aprecia ligeramente el crecimiento de un borde CH alrededor de la periferia de la fibra, mencionado por varios autores en investigaciones de matrices cementicias fibro-reforzadas [3, 38, 39].

Paralelamente al realizar las primeras observaciones se detectó que el procedimiento de elaboración de muestras empleado no es aconsejable en materiales compuestos con fibras plásticas dado que el pulido produce incisiones en la fibra y arrastra compuestos de la matriz hacia ésta, contaminando algunas zonas.

Asimismo, la fuerza ejercida en el pulido favorece el desprendimiento de la fibra, dejando zonas huecas a lo largo de la interfaz impidiendo analizarla correctamente (Figura 4.102 y 4.103).

Figura 4.102 - Micrografía de interfaz contaminada en pasta de cemento Pórtland y fibra P-NC  
A – vista general de zona contaminada; B – detalle con observación de cristales

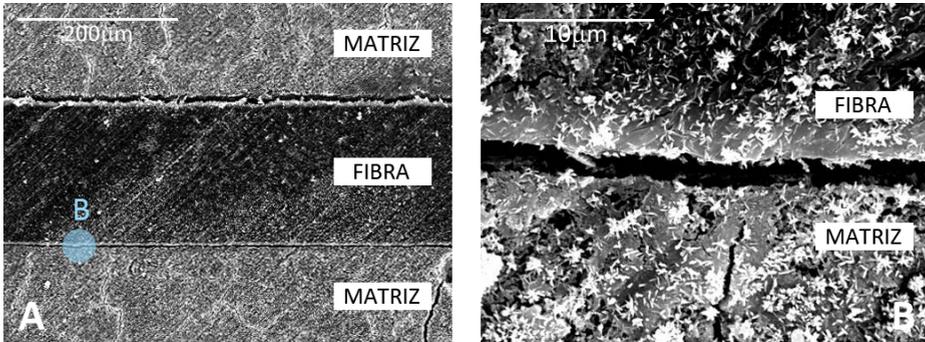
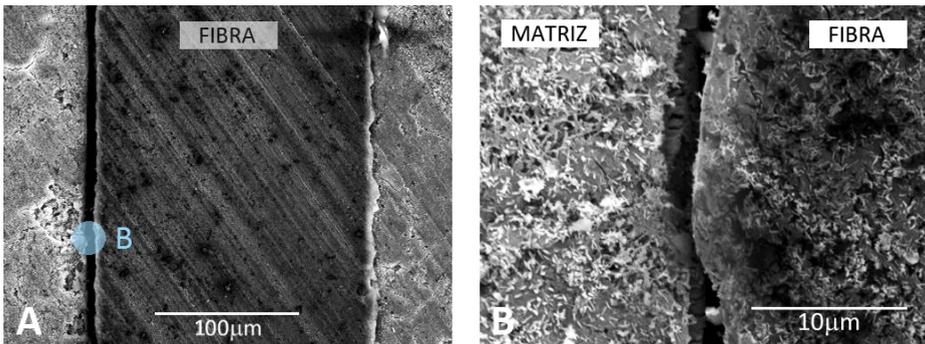


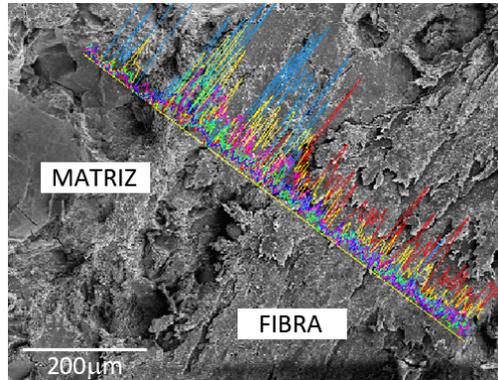
Figura 4.103 - Micrografía de interfaz separada en pasta de cemento Pórtland y fibra P-NC  
A – vista general de las interfaces; B – detalle de ruptura de interfaz



A continuación se analizaron muestras obtenidas por corte con sierra de disco manual de probetas de mortero reforzado con iguales fibras, P-NC. Las muestras, de  $6 \times 6 \times 4 \text{ mm}^3$  ( $\pm 1 \text{ mm}$  cada una de ellas), con 56 días de edad, se curaron en cámara húmeda con  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  y una humedad relativa  $\geq 90\%$ .

La micrografía de esta muestra, donde se observa el espectro de los elementos encontrados sobre la línea trazada que abarca matriz/fibra, expuesta durante 100 segundos, se pueden observar en la Figura 4.104.

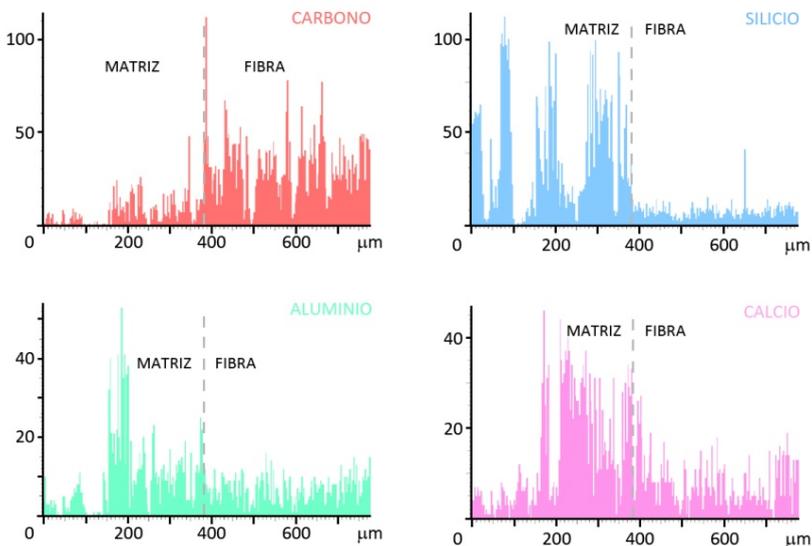
Figura 4.104 - Micrografía y microanálisis por EDS de interfaces matriz/fibra en mortero de cemento Pórtland reforzado con fibras de PET (P-NC)



En estos espectros se observa que en la interfaz de la matriz se produce un aumento de silicio y aluminio, relacionados con los silicoaluminatos presentes en la misma, con un contenido de calcio menor que si se encontrara sólo portlandita.

En la Figura 4.105 se exponen los espectros de los elementos principales encontrados.

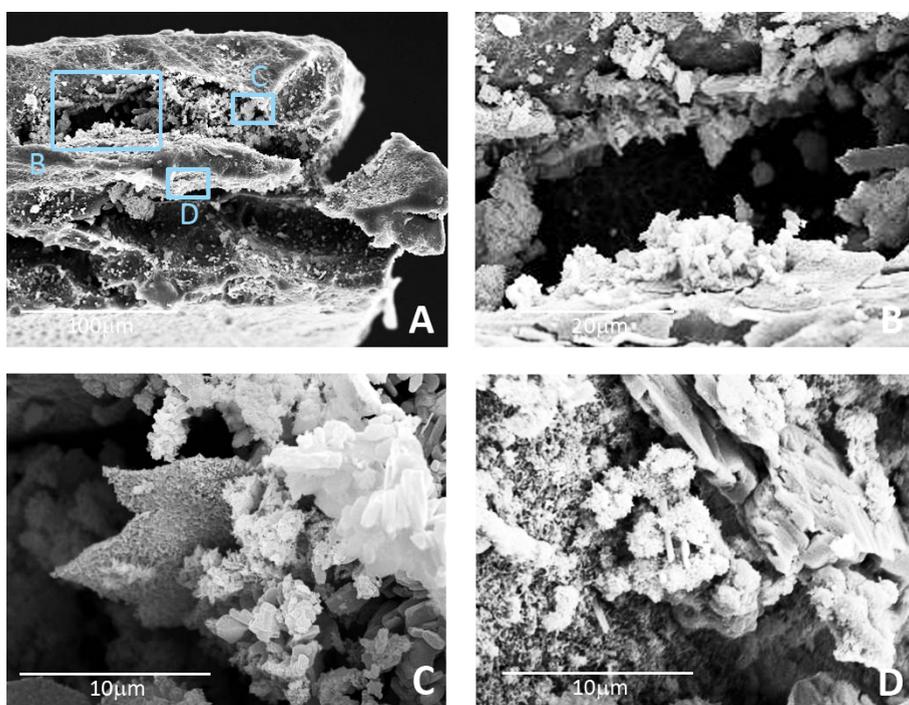
Figura 4.105 - Espectros de los principales elementos detectados por microanálisis EDS en interfaces de mortero de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC).



La presencia de estos elementos confirma las micrografías obtenidas en las fibras inmersas en pasta de cemento Pórtland, con residuos de dicha pasta en las oquedades de la fibra (Figura 4.106).

En estas imágenes, particularmente en los detalles, se pueden observar los productos que se han formado dentro de las zonas degradadas de la fibra, particularmente los de forma amorfa que se asocian a la presencia de silicato cálcico hidratado.

Figura 4.106 - Micrografías de residuos de pasta de cemento Pórtland en fibras de P-NC. A – sector general; B, C y D – detalles indicados en A



#### 4.2.3.2 Comportamiento mecánico

En un material compuesto fibro-reforzado, la interfaz es la encargada de poner en carga a la fibra, por ella se realiza la transmisión de esfuerzos entre ambos materiales y la caracterización mecánica de esta unión es necesaria para conocer el comportamiento y la durabilidad del conjunto [40].

Particularmente, cuando la matriz a fibroreforzar es frágil, como en el caso de matrices cementicias, su fractura antecede al trabajo de la fibra para coser las fisuras. Llegado a este punto la transmisión de esfuerzos se realiza a través de fuerzas de rozamiento producidas al deslizar la fibra en el proceso de arrancamiento.

Investigaciones demuestran que el aumento significativo de resistencia y tenacidad del material compuesto se produce cuando la adherencia entre los dos materiales falla y se produce el arrancamiento de la fibra [41]. El aumento de tenacidad se corresponde con un conjunto de mecanismos de absorción de energía entre los cuales se encuentran la rotura de la interfaz, el desvío de grietas y el arrancamiento de las fibras, por lo que, para obtener un material con mayor tenacidad, es aconsejable tener una débil adhesión en la interfaz [42].

Varios autores han estudiado y modelizado los esfuerzos que se producen en esta interfaz [43-45]. Se han empleado técnicas y ensayos de distinta índole con el fin de cuantificar dichos esfuerzos, llegando la mayoría de los autores a la conclusión que el ensayo de extracción de fibras, pull-out, es el más representativo.

Mediante este ensayo se puede determinar una longitud crítica de fibra ( $L_{crit}$ ) que se obtiene en el momento en que ésta fractura sin desprenderse de la matriz. Por debajo de este valor, la fibra se desliza y se puede obtener el valor de resistencia a cortante de la interfaz con un simple equilibrio de fuerzas [46].

Con el fin de determinar una longitud crítica primaria y verificar si las longitudes de fibras empleadas se encuentran en valores menores a ella, se han realizado ensayos de pull-out en fibras P-NC embebidas en mortero plástico de cemento Pórtland, siguiendo el procedimiento indicado en el punto 3.3.4.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

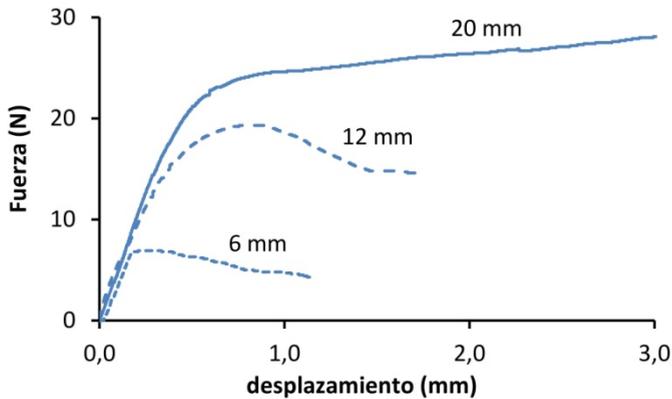
#### 4.2.3.3 Ensayo de pull-out simple

En primera instancia, 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  $\geq 90\%$ . La velocidad de aplicación de la fuerza fue de 1 mm/min.

En la Figura 4.107 se exponen las gráficas fuerza/desplazamiento obtenidas con las distintas longitudes. En las muestras con fibras de 6 mm y 12 mm de longitud, los ensayos se detuvieron automáticamente cuando el equipo de medición, dinamómetro, no recibió más señal de esfuerzo, observándose el arrancamiento de la matriz.

Figura 4.107 - Pull-out, gráficas fuerza/desplazamiento para muestras con 7 días de curado.



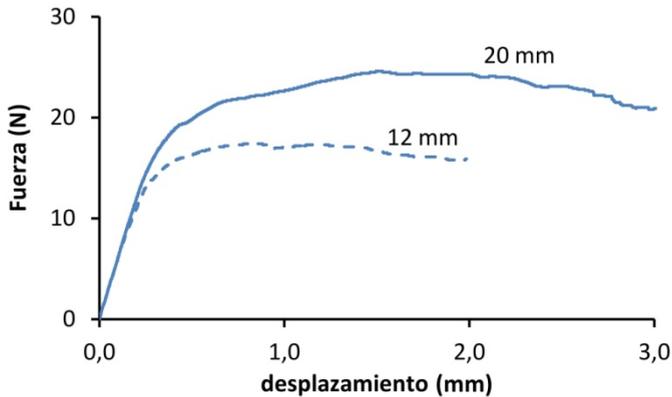
En las muestras con longitud de fibra embebida de 20 mm se produjo la rotura del 50% de las muestras al alcanzar los 3 mm de desplazamiento, por lo que se toma éste como valor de finalización del ensayo y dimensión de la mitad de la longitud crítica a los 7 días de curado.

En estas curvas se observa que el trabajo conjunto fibra/matriz se corresponde, presentando periodos proporcionales con pendientes similares para las tres longitudes de fibra.

Habiéndose observado que las fibras embebidas 6 mm están muy alejadas de los valores de longitud crítica, se realizó nuevamente el ensayo con fibras P-NC de 1 mm de ancho y longitudes de 12 mm y 20 mm 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  $\geq 90\%$ . La velocidad de aplicación

de la fuerza continuó siendo de 1 mm/min. En la Figura 4.108 se representan las curvas fuerza/desplazamiento obtenidas en estos ensayos.

Figura 4.108 - Pull-out, gráficas fuerza/desplazamiento para muestras con 28 días de curado.



En estas curvas, nuevamente se puede apreciar que al aumentar la longitud de fibra se incrementa la zona proporcional, la que muestra el trabajo conjunto fibra/matriz. Esto implica que existe un mayor tiempo de trabajo conjunto entre ambos materiales aumentando la fuerza que se requiere para fracturar la matriz.

Asimismo, de los resultados obtenidos con una longitud embebida de 20 mm solamente en el 20% llegó a la fractura de la fibra, por lo que se puede confirmar este valor como la mitad de la longitud crítica para esta sección ( $L_{crit} = 40$  mm).

En base a estos resultados se ha determinado la tensión a cortante de la interfaz ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ) así como la tensión máxima de tracción que se produjo en la sección de la fibra ( $\sigma_{Fm\acute{a}x}$ ) para el valor de carga máxima.

El procedimiento del primer cálculo se realizó simplificando el estado tensional de la interfaz como constante en toda la longitud de la fibra embebida que, como ha sido estudiado en investigaciones anteriores [3], no es un valor físicamente útil por no ser extrapolable a otras longitudes de fibras pero nos permite obtener valores comparativos entre fibras a distintas edades.

La ecuación a emplear resulta de un equilibrio simple de esfuerzos [3, 47] que se ha adaptado a la sección rectangular de las fibras empleadas en este trabajo según las siguientes ecuaciones:

$$F_{m\acute{a}x} = \tau_{Fm\acute{a}x} \cdot 2(a_{Fe} + e_{Fe}) \cdot L_{Fe} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

$$\tau_{Fm\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{2(a_{Fe} + e_{Fe}) \cdot L_{Fe}} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

siendo  $F_{m\acute{a}x}$  el máximo esfuerzo en Newtons,  $\tau_{Fm\acute{a}x}$  la tensión a cortante en la interfaz en MPa,  $a_{Fe}$ ,  $e_{Fe}$  y  $L_{Fe}$  ancho, espesor y longitud de la fibra embebida en milímetros, considerándose los valores reales y no el diámetro equivalente de la fibra.

La determinación de la tensión que se produjo en la fibra se realizó tomando como sollicitación el máximo esfuerzo en Newtons ( $F_{m\acute{a}x}$ ) y las dimensiones de la sección en milímetros ( $a_{Fe}$  y  $e_{Fe}$ ), obteniéndose la tensión  $\sigma_{Fm\acute{a}x}$  en MPa, y así poder compararla con los valores obtenidos en el ensayo de tracción desarrollado en el punto 4.1.2.

Los valores determinados en los ensayos realizados se representan en las Figura 4.109 y 4.110.

Figura 4.109 – Pull-out - tensión a cortante de la interfaz con distintas longitudes de fibra y a distintas edades de curado

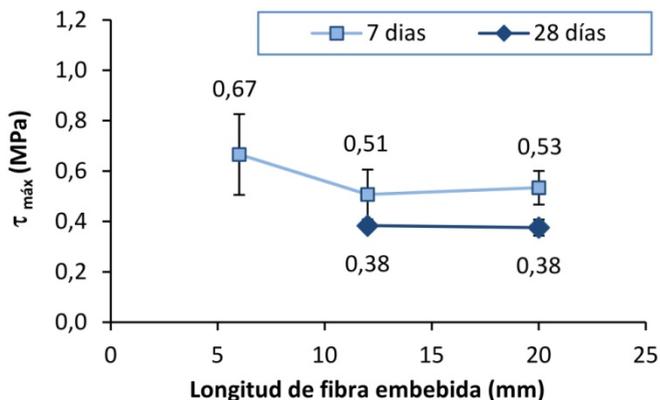
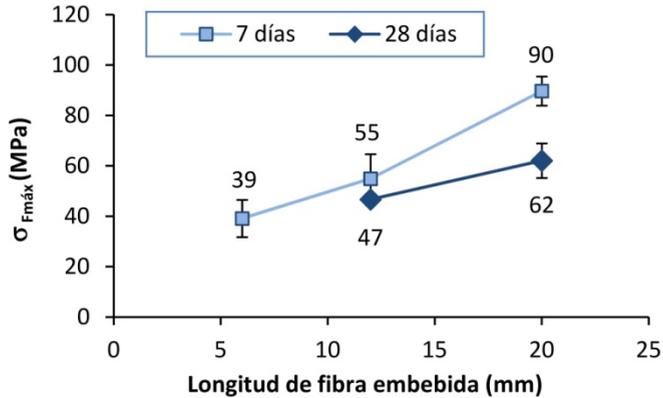


Figura 4.110 – Pull-out - tensión máxima producida en la fibra con distintas longitudes y a distintas edades de curado



Se observa que la tensión a cortante de la interfaz, para ambas edades, mantiene el valor en las fibras de 12 mm y 20 mm, aunque hay que recordar que el diagrama de tensiones de partida no es el real, que la distribución constante adoptada es una simplificación.

Asimismo, se observa que, ante igual longitud de fibra embebida, a los 28 días la tensión a cortante de la interfaz disminuye entre 20% y 25%. Esto puede estar relacionado con que a los 7 días la interfaz se encuentra más densa que a los 28 días, donde los productos de hidratación se han seguido formando en esta superficie de contacto, y por ello produce mayor resistencia al arrancamiento. Otra posible explicación está relacionada con el incremento en la degradación de la fibra observada durante ese periodo, según lo expuesto en el punto 4.1.4.3, vinculada también a la formación de los productos de hidratación del cemento en la interfaz.

Analizando las tensiones que se han producido en la fibra se observa que a los 28 días en fibras de 12 mm se obtienen valores correspondientes al 44% de la resistencia a tracción simple (106,92 MPa) y con longitudes embebidas de 20 mm valores correspondientes al 58%. Si bien estos datos no son físicamente aplicables nos permiten observar que, aún con 20 mm de longitud, nos encontramos utilizando las fibras a menos del 60% de su capacidad resistente lo que sugiere la existencia de procesos de interacción fibra/matriz que se deben continuar investigando.

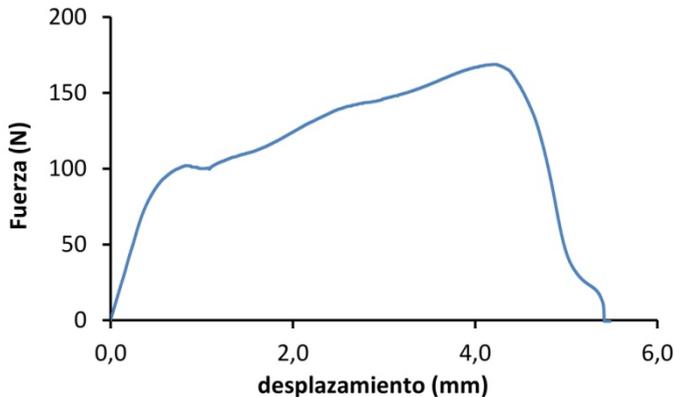
#### 4.2.3.4 Ensayo de pull-out doble

A los efectos de verificar el comportamiento de las fibras con longitudes mayores a la longitud crítica ( $L_{crit}$ ) totalmente embebidas en mortero plástico, de iguales características al empleado en el punto anterior, se realizaron muestras con los moldes y procedimientos especificados en los puntos 3.2.9.3 y 3.3.4 respectivamente.

Las fibras utilizadas fueron las obtenidas por sistema de corte mecánico, de  $4 \pm 0,5$  mm x  $50 \pm 5$  mm, las cuales no sólo superan los 40 mm de longitud crítica determinada para fibras de 1 mm sino que también son cuatro veces más anchas que las anteriores por lo que se debería llegar a la fractura de la fibra antes que su desprendimiento total.

La curva fuerza/desplazamiento obtenida se representa en la Figura 4.111

Figura 4.111 - Pull-out, curva fuerza/desplazamiento para muestra en moldes dobles a 28 días de curado.



Analizando la curva se observa claramente que, luego del trabajo conjunto fibra/matriz representado por el tramo proporcional, tras la fractura y el desprendimiento de la zona exterior de la fibra, ésta continúa con una transferencia de tensión hasta su rotura.

En esta oportunidad el valor de tensión de rotura de la fibra fue un 3% mayor que la tensión a tracción simple. Se puede presumir que la zona de desprendimiento, con la tensión de fricción que le pudiera ocasionar, generó un efecto en la fibra similar a los 10 mm de longitud libre del ensayo de tracción simple.

#### 4.2.4 Características Mecánicas de probetas prismáticas

En base a los resultados de ensayos mecánicos en probetas prismáticas obtenidos en los estudios preliminares, con fibras de 6 mm de longitud y porcentaje de adición del 2% del volumen total de mortero de cemento Pórtland, se analizaron muestras con fibras de mayor dimensión pero sin llegar a la longitud crítica determinada.

Se optó por duplicar la longitud inicial y, para que el número de fibras no disminuyera, como mínimo duplicar el porcentaje de las mismas.

Dadas las características hidrófilas del PET, el incremento de fibras produjo un mortero más seco, que no cumplía condiciones de trabajabilidad adecuadas, dificultando la homogeneización del material compuesto.

En base a la premisa de que este material ofrezca la posibilidad de ser fácilmente apropiado por personas sin especialización constructiva, uso en autoconstrucción por ejemplo, se optó por no utilizar aditivos plastificantes y pasar de una adición de fibras a una sustitución por igual volumen de árido.

Se utilizaron dos dosificaciones, con una sustitución de 4% y 6% del volumen total. Con el mayor porcentaje, nuevamente la característica hidrófila del polímero provocó que apenas se llegara a los límites de trabajabilidad y homogeneidad deseables en la utilización de este material para condiciones semi-artesanales.

Si bien el volumen de árido retirado es el mismo que el de fibra adicionada, por diferencia de densidad y forma, las fibras presentan menor superficie específica pero con característica hidrófila. En la práctica, a mayor número de fibras utilizado se produce un aumento de agua atraída de forma no proporcional al volumen sustituido.

Esta característica de los polímeros podría ser modificada, con un tratamiento con plasma por ejemplo, generando en el proceso de obtención un incremento de costo de las fibras contrario a los objetivos de este trabajo.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>, con mortero plástico según materiales y procedimientos indicados en el Capítulo 3, así como los valores determinados a partir de ellos.

#### 4.2.4.1 Resistencia a flexión

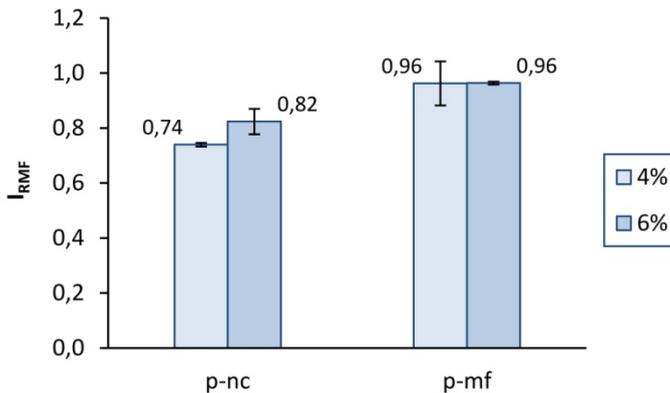
Para determinar la resistencia a flexión se realizó el ensayo a tres puntos según procedimiento indicado en Norma UNE-EN 196-1:2005 [5] y desarrollado en el punto 3.3.7.1.

Las muestras fueron elaboradas con mortero de cemento Pórtland reforzado con fibras procedentes de envases post-consumo de bebidas sin carbonatar (P-NC) y fibras multifilamento elaborados a partir de igual residuo (P-MF) a efecto de comparar las prestaciones presentadas por ambos tipos, obtenidas por corte directo y reprocesadas. Se utilizaron ambos porcentajes de sustitución, 4% y 6%. Asimismo se elaboraron muestras control, con mortero de cemento Pórtland sin fibras, con el 100% de árido.

Se estableció la tensión máxima alcanzada en cada muestra, obteniéndose los valores medios ( $\sigma_{m\acute{a}x F}$ ) así como la desviación estándar (DS) que nos permite visualizar el grado de dispersión que presentan los datos.

Para el análisis comparativo se determinaron índices de resistencia mecánica a flexión ( $I_{RMF}$ ) de los morteros producidos, en base a la relación entre la resistencia a flexión de los morteros fibroreforzados respecto a la del mortero control (mortero sin fibrorefuerzo) al cual corresponde el valor 1. Los resultados obtenidos se exponen en la Figura 4.112.

Figura 4.112 - Índice de resistencia mecánica a flexión ( $I_{RMF}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>.



Se puede observar que la sustitución de árido por fibra ha generado una mayor variación de resistencia a flexión con las fibras P-NC, produciendo valores de disminución de 25% y 18% al utilizarse 4% y 6% de fibra respectivamente. Sin embargo, en el empleo de fibras P-MF los valores de resistencia apenas se han visto afectados, siendo la misma disminución para ambos porcentajes de fibra.

Cabe recordar que, si bien todas las muestras mantienen la relación agregados/matriz, como se ha expuesto en el Capítulo 3 punto 3.3.5, una sustitución por fibras de 4% y 6% del volumen total implica una disminución en el volumen del árido de 7% y 10,5% respectivamente.

Asimismo, la diferencia existente según la fibra utilizada podría tener su origen en la resistencia de la interfaz fibra/matriz vinculada a la textura superficial y relaciones de aspecto que presentan cada una de ellas. Las fibras producidas por corte de PET (P-NC) tienen un diámetro equivalente del doble del diámetro real de las fibras multifilamento (P-MF). Esto hace que la distribución de fibras dentro del material permita, en el segundo caso, un mejor reparto de tensiones al contar con mayor número de fibras y una mayor superficie de contacto con la matriz.

Si analizamos el efecto del porcentaje empleado con cada una de las fibras, se observa que en las fibras P-NC la mayor cantidad de fibras conlleva a un incremento en la resistencia a flexión, opuesto a la situación presentada por las fibras multifilamento que se mantiene en ambas proporciones.

La dispersión de los valores obtenidos en todos los casos es baja, con un coeficiente de variación de 8% en el peor de los casos.

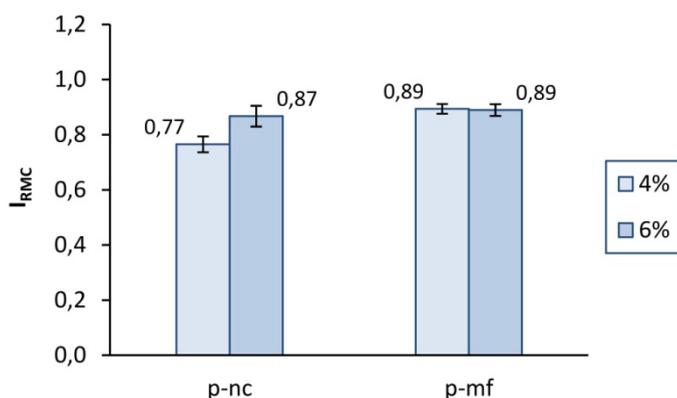
#### 4.2.4.2 Resistencia a compresión

A cada una de las dos mitades de la probeta obtenida tras el ensayo de flexión, se le determinó la resistencia a compresión siguiendo el procedimiento indicado en Norma UNE-EN 196-1:2005 [5] y desarrollado en el punto 3.3.7.2.

Se estableció la tensión máxima alcanzada en cada muestra, obteniéndose los valores medios ( $\sigma_{Cm\acute{a}x}$ ) así como la desviación estándar (DS) que nos permite visualizar el grado de dispersión que presentan los datos.

Para el análisis comparativo se determinaron índices de resistencia mecánica a compresión ( $I_{RMC}$ ) de los morteros producidos, en base a la relación entre la resistencia a compresión de los morteros fibroreforzados respecto a la del mortero control (mortero sin fibrorefuerzo) al cual corresponde el valor uno. En la Figura 4.113 se exponen comparativamente los resultados obtenidos.

Figura 4.113 - Índice de resistencia mecánica a compresión ( $I_{RMC}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>.



Se puede observar que los valores obtenidos presentan un menor índice que la muestra control, sin tener relación con los resultados alcanzados en los ensayos de flexión. Si bien se mantiene que las resistencias a compresión de las muestras con fibras P-NC son menores que con fibras P-MF, las diferencias son incluso mínimas cuando se emplea un 6% de fibra.

Esta disminución podría atribuirse a la menor resistencia a compresión que presenta el polímero frente al árido sustituido, apreciándose una mayor reducción en las fibras que en forma individual tienen mayor volumen (P-NC) generando zonas concentradas de menor resistencia.

Los resultados obtenidos presentan dispersiones bajas, entre el 3% y 5% para fibras P-NC y menores al 2,5% en las fibras multifilamento, lo que nos lleva a pensar que la distribución de fibras en la matriz se ha realizado de forma homogénea.

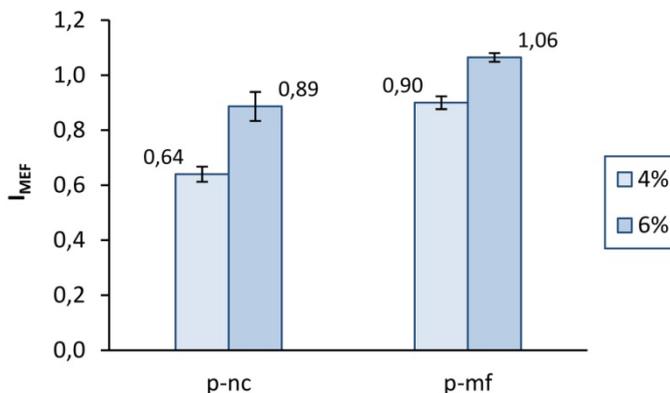
#### 4.2.4.3 Módulos elásticos

A partir de las curvas tensión/deformación unitaria obtenidas en los ensayos de flexión y compresión se han determinado los módulos elásticos correspondientes a cada sollicitación según procedimiento establecido en el Capítulo 3, punto 3.3.7.3.

Para el análisis comparativo se determinó el índice de módulo elástico a flexión ( $I_{MEF}$ ) e índice de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) de los morteros producidos, en base a la relación entre los módulos elásticos correspondientes a los morteros fibroreforzados respecto a los del mortero control (mortero sin fibro-refuerzo) al cual corresponde el valor 1 en ambos casos.

En la Figura 4.114 se grafican los valores obtenidos para el módulo elástico a flexión. Se puede observar que el índice obtenido en las muestras con fibras P-NC es menor que 1 y que el determinado para las muestras con fibras P-MF.

Figura 4.114 - Índice de módulo elástico a flexión ( $I_{MEF}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibroreforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>.



Según la Ley de Hooke, las tensiones son proporcionales a las deformaciones. Esto es válido en un material homogéneo, isótropo y continuo, que no es nuestro caso pero lo podríamos considerar esa misma relación en la zona elástica del diagrama tensión/deformación donde se determinaron los módulos. En base a esta relación,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \rightarrow \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

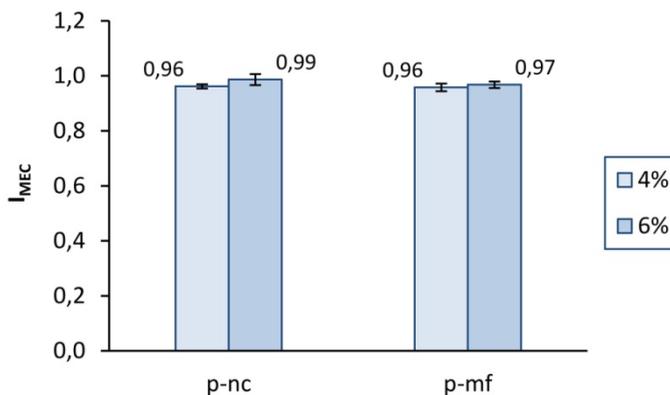
donde  $\sigma$  es la tensión,  $E$  el módulo elástico y  $\varepsilon$  la deformación, las muestras elaboradas con fibras P-NC son más elásticas que las reforzadas con fibras multifilamentos (P-MF). Esto implica que ante un mismo valor de esfuerzo se deforman más o lo que es lo mismo, para producir la misma deformación requieren de un menor esfuerzo o trabajo.

Asimismo, si comparamos los valores según porcentaje de fibra empleado, se observa que con un 6% de fibra se produce un mayor incremento cuando se refuerza con fibras P-NC que con las fibras P-MF. En todos los casos, la dispersión de los valores continúan siendo bajos, con coeficientes de variación menores o iguales a 5%.

En la Figura 4.115 se muestran los índices de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) obtenidos. Para esta sollicitación, los valores varían mínimamente respecto a la muestra control, entre 1% y 4% como se puede observar en la gráfica. Esto indica que la sustitución de áridos por fibra no produce grandes diferencias en cuanto al grado de elasticidad respecto a un mortero sin refuerzo.

Estos valores presentan un coeficiente de variación menor o igual a 2% lo que nos muestra nuevamente que la distribución de fibras se ha realizado en forma homogénea en cada una de las mitades de las probetas ensayadas a compresión.

Figura 4.115 - Índice de módulo elástico a compresión ( $I_{MEC}$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>.



#### 4.2.4.4 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 [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, y desarrollados en el punto 3.3.7.4 del Capítulo 3.

Los valores obtenidos se exponen en las Figuras 4.116 a 4.118.

Figura 4.116 - Tenacidad ( $T$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .

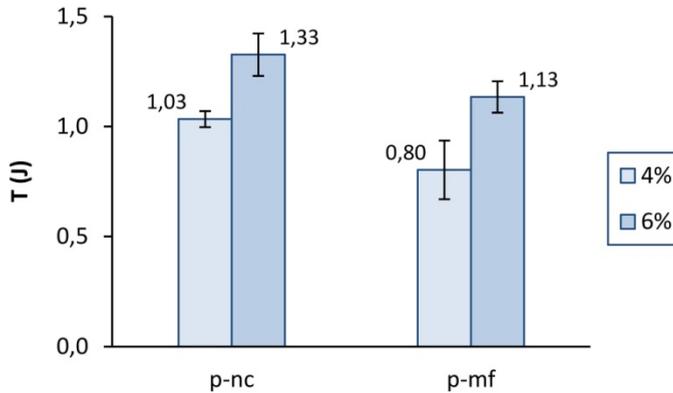


Figura 4.117 - Índices de tenacidad ( $I_n$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , 4%.

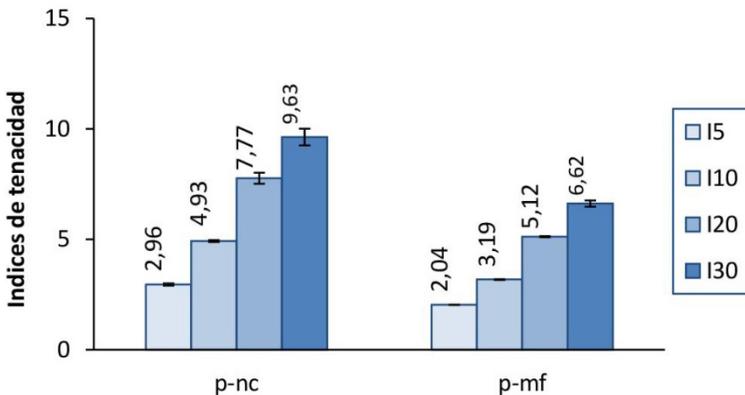
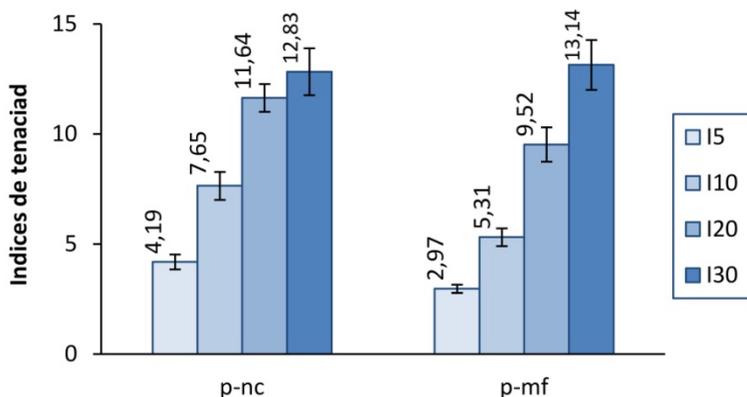


Figura 4.118 - Índices de tenacidad ( $I_n$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>, 6%.



Se observa que las muestras reforzadas con fibras P-NC tienen una ganancia en tenacidad entre un 3% y un 33% si se sustituye 4% y 6% respectivamente, con una dispersión en los resultados menores o iguales al 10%. Sin embargo, las muestras reforzadas con 4% de fibras P-MF presentan un 20% menos de tenacidad que la muestra control, y con 6% una ganancia de solamente el 13%.

Esto nos muestra que las fibras obtenidas por corte mecánico de envases post-consumo de bebidas no carbonatadas, al incrementar la capacidad de absorción de energía serán más aptas para resistir esfuerzos de impacto o vibraciones que el material compuesto con fibras multifilamento.

Analizando los índices, en la Figura 4.117 se observa que esa tendencia, de mejor absorción de energía por parte del mortero reforzado con P-NC, se reafirma si bien no alcanza ni a la tercera parte de los valores que corresponderían a un material elasto-plástico ideal, según lo expuesto en el capítulo 3, punto 3.3.7.4.

No obstante, para un 6% de sustitución (Figura 4.118) las diferencias entre los índices correspondientes a ambas fibras es menor, con valores entre 20% y 40% mayores en las muestras reforzadas con P-NC para los tres primeros índices, y solamente 2% menor en el índice 30.

#### 4.2.5 Características mecánicas de probetas laminares con matriz de cemento Pórtland.

En base al resultado obtenido en el ítem anterior, el aporte en tenacidad resultante del refuerzo con fibras obtenidas por corte de envases post-consumo, se entiende que este tipo de material podría aplicarse a elementos constructivos de pequeño espesor como placas de revestimiento interior, placas de cubierta ó tejas, entre otros.

Se realizaron probetas laminares con mortero de cemento Pórtland reforzado, en general, con fibras P-NC y P-C, en un porcentaje de 4% de sustitución de árido en base a la trabajabilidad observada en las probetas prismáticas. Asimismo, al lograr un sistema mecanizado de corte por medio de destructoras de documentos descrito en el punto 3.2.12, se comienzan a utilizar las partículas obtenidas por medio de estos dispositivos en la elaboración de estas probetas laminares.

Como se expuso en el Capítulo 3, punto 3.3.6, se realizaron muestras de 2 dimensiones: por una parte, placas de  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ , obtenidas bien por corte de placas de mayor tamaño o bien directamente utilizando moldes de igual dimensión; y por otra parte placas de  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$ . Estas muestras se reforzaron con fibras de diferentes tamaños provenientes de envases post-consumo de PET (P-NC, P-C y P-MF), produciendo las combinaciones que se expresan en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 - Tipos de muestras ensayadas. Codificación.

(<sup>1</sup>) Obtenidas por corte de placas de  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$  - (<sup>2</sup>) Obtenidas en moldes de la misma dimensión  
(\* ) los espesores de las fibras no se mencionan por ser constante en cada material

tamaño de muestra ( $\text{cm}^3$ )	fibras									
	sin fibra	p-nc (*)				p-c (*)				p-mf
		1x18 $\text{mm}^2$	4x18 $\text{mm}^2$	4x35 $\text{mm}^2$	4x50 $\text{mm}^2$	1x18 $\text{mm}^2$	4x18 $\text{mm}^2$	4x35 $\text{mm}^2$	4x50 $\text{mm}^2$	
<b>22,5x5x1</b> ( <sup>1</sup> )			A.1b		A.1d		A.2b		A.2d	
<b>22,5x5x1</b> ( <sup>2</sup> )	B.0	B.1a	B.1b			B.2a	B.2b			B.3a
<b>24x24x1</b>	C.0		C.1b	C.1c			C.2b	C.2c		

Según procedimientos indicados en el punto 3.3.7.1 todas se han ensayado a flexión, con 4 apoyos en las muestras de 5 cm de ancho y 3 apoyos en las muestras de 24 cm, y

en base a los resultados obtenidos, para su análisis, se ha determinado tensión máxima de rotura, módulo elástico a flexión y tenacidad. Asimismo en las últimas se ha estudiado la resistencia al impacto.

A continuación se muestran los resultados obtenidos, clasificados por característica mecánica analizada, ordenados en base a la línea de investigación adoptada que se corresponde con los tamaños de probetas y los tipos de fibra codificados en la Tabla 4.15.

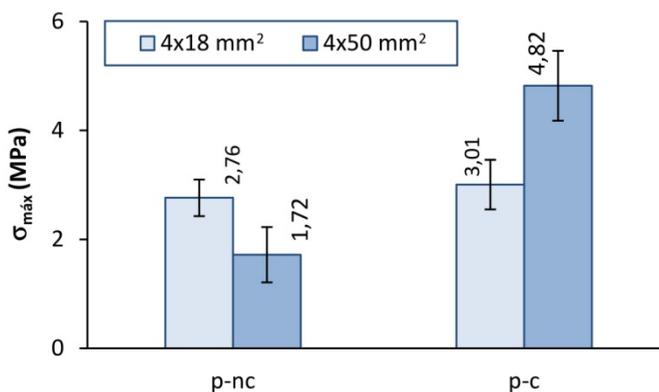
#### 4.2.5.1 Resistencia a flexión

En función de la variedad de tipos que se obtuvieron en la combinación de tamaños de muestras y fibras, se realizará el análisis de los resultados desde tres puntos de vista:

- ✓ por tamaño de muestra
- ✓ por tamaño de fibra
- ✓ por tipo de fibra

Dado que los tres parámetros están interrelacionados, se toma como base el tamaño de muestra y en su desarrollo se incluyen los parámetros correspondientes a las fibras utilizadas. Comenzando el análisis por el tamaño de muestra A, los valores obtenidos para se representan en la Figura 4.119, según tipo y tamaño de fibra utilizados.

Figura 4.119 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{Fm\acute{a}x}$ ) en muestras tipo A (tamaño  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  obtenidas por corte de placas de  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$ )



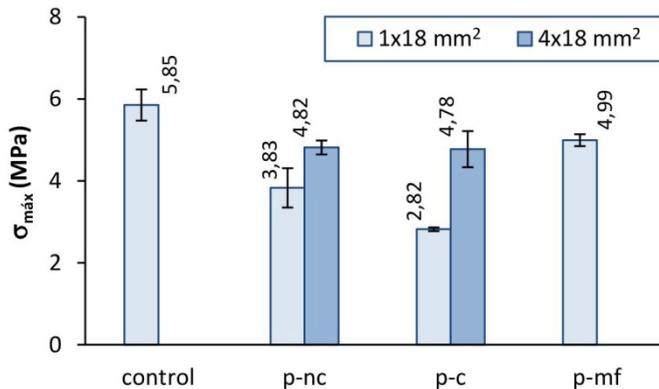
En estos valores se observa que los resultados obtenidos con las fibras P-C son mayores a los que nos proporcionan las fibras P-NC.

Asimismo se observa que no existe relación entre las variaciones que se producen en cada tipo de fibra según el tamaño empleado. Mientras en las fibras P-NC al aumentar el tamaño de la misma la resistencia disminuye un 38%, en las fibras P-C aumenta un 60%.

Esta variación no se puede explicar desde el punto de vista del comportamiento del material compuesto en sí mismo, por lo que se entiende que, tanto las grandes diferencias en valores y variaciones, pueden tener su origen en las tensiones que se le producen a las muestras en el momento del corte con la sierra circular.

En base a esa hipótesis se ensayaron las muestras tipo B, realizadas con moldes de  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ , que, como se mencionó en el punto 3.3.6, no han tenido más manipulación que el desmolde y colocación en la cámara húmeda. En la Figura 4.120 se pueden observar los resultados obtenidos para estas muestras.

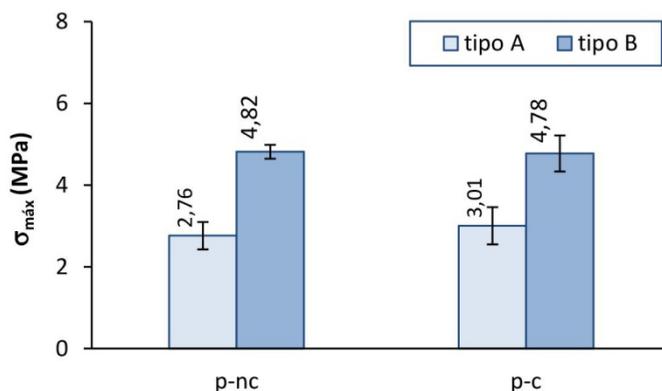
Figura 4.120 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{F\text{máx}}$ ) en muestras tipo B (tamaño  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)



Se observa que las resistencias obtenidas en los morteros reforzados con fibras de 1 mm de ancho, procedentes de envases post-consumo, P-NC y P-C, son 43,5% y 23% menores que la muestras reforzada con fibras multifilamentos, P-MF, y 48% y 52% menores que la muestra control, sin fibroreforzar. Asimismo, se percibe que los valores obtenidos con el empleo de fibras P-NC y P-C de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$  presentan valores similares a los obtenidos con las fibras multifilamento, P-MF.

Comparando los resultados adquiridos con las fibras obtenidas mediante una de las destructoras de documentos, de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ , en las muestras tipo A y B, se aprecia que en las primeras los valores de tensión son menores un 43% para las fibras P-NC y 37% en las fibras P-C (Figura 4.121).

Figura 4.121 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) en muestras tipo A y B. Fibras  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ .



Analizando la dispersión de resultados en cada uno de los casos, se aprecia que en las probetas tipo A son mayores, con valores de 12% y 15% para P-NC y P-C respectivamente, mientras que en las muestras tipo B corresponden a 4% y 9%.

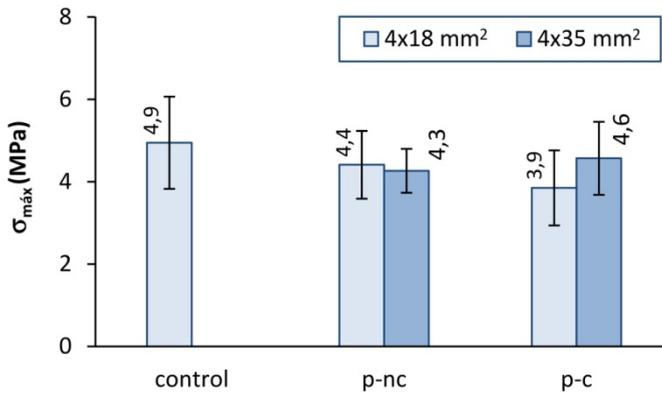
Estas diferencias podrían confirmar la hipótesis de que el corte realizado con la sierra, con disco de 3 mm de espesor, ha producido tensiones y micro fisuras en las muestras que se traducen en un resultado bastante menor al alcanzando con muestras obtenidas directamente con esa dimensión.

En base a estos resultados se opta por realizar ensayos en dos direcciones a placa entera, adaptando el procedimiento especificado en la Norma UNE 12467:2006 [48], y explicitado en el punto 3.3.7.1, para placas planas de fibrocemento. La diferencia de estas placas, no solo se aprecia en el tamaño y método de ensayo, a 3 puntos, sino también en el curado.

En esta situación el curado se realizó en cámara húmeda por un período de 15 días, frente a los 28 días de las placas tipo A y B, cumpliendo con lo establecido en la citada norma.

Los valores obtenidos en estas muestras, tipo C, se exponen en la Figura 4.122. Se observa que los valores de tensión obtenidos son menores que los obtenidos en la muestra control, siendo la máxima diferencia de un 20% en las muestras con refuerzo de fibras P-C de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ . Sin embargo, utilizando como refuerzo las fibras elaboradas a partir de envases post-consumo de bebidas sin carbonatar, P-NC, la pérdida máxima de resistencia corresponde a 12% en ambos tamaños de fibra.

Figura 4.122 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) en muestras tipo C. (tamaño  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)



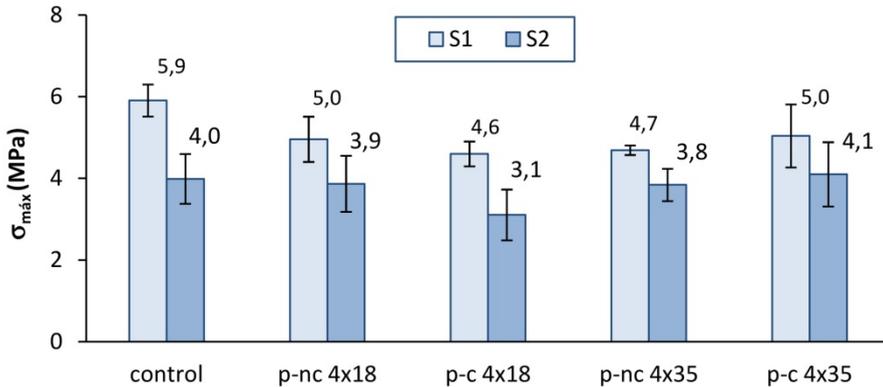
En general, el coeficiente de variación de los valores obtenidos es del orden de 20%, excepto en las fibras P-NC de  $4 \times 35 \text{ mm}^2$  donde es un poco menor, 12%. En base a que estos valores corresponden a la media de medidas realizadas en ambas direcciones, se han procesado los datos obtenidos en cada sentido por separado para comprobar si la dispersión está relacionada a factores intervinientes en el proceso de elaboración de las placas o de ensayo.

Para ello, se ha denominado sentido 1 (S1) al que corresponde a la sección perpendicular a la dirección principal de vibrado y al cual se le realizó el ensayo en primer lugar, y sentido 2 (S2) al correspondientes a la sección paralela a la dirección principal de vibrado y al cual se le realizó el ensayo en segundo lugar.

Los resultados de este análisis comparativo se muestran en la Figura 4.123. Se observa que los valores obtenidos en el sentido 2 siempre son menores que los obtenidos en el sentido 1, habiendo disminuido las dispersiones existentes en cada uno de ellos pero

resultando menores los correspondientes al sentido 1, sección perpendicular a la dirección principal de vibrado.

Figura 4.123 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras tipo C, comparación de ambos sentidos. (tamaño 24 x 24 x 1 cm<sup>3</sup> realizadas en moldes de igual dimensión)



Estas diferencias, que alcanzan valores de 32% en la muestra control y de hasta 22% en las muestras reforzadas con fibras, se pueden explicar por dos posibles causas.

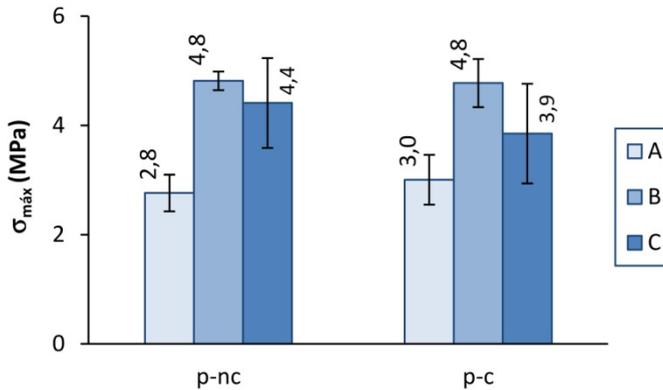
La primera está relacionada con el vibrado utilizado en el momento de producción de las mismas. La mesa vibradora empleada presenta una dirección principal de movimiento que puede producir una orientación en el material, justificando este razonamiento que los mayores valores se obtienen en la sección perpendicular a dicha dirección, fundamentalmente en las muestras reforzadas con fibras.

La segunda se relaciona con el procedimiento de rotura, dado que al ensayar la sección 2 la dimensión de cálculo no se encuentra en una sola pieza sino en dos no trabajando en forma solidaria en el momento de aplicación de la carga.

En esta etapa de la investigación no se ha podido descartar ninguna de ellas, por lo que los análisis se realizarán tomando como valor el determinado según norma.

Finalmente, si comparamos los valores obtenidos en los tres tipos de muestras (A, B y C) reforzadas con igual tipo de fibra, P-NC de 4 x 18 mm<sup>2</sup>, se observa que los valores obtenidos las muestras C son menores que los conseguido con las tipo B y, como se mencionó anteriormente, más dispersos (Figura 4.124).

Figura 4.124 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{\max}$ ) en muestras tipo A, B y C. Fibras 4 x 18 mm<sup>2</sup>.  
(características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)



En este análisis cabe recordar que el tiempo de curado de las muestras tipo C es menor, por lo que, a 28 días, podrían presentar valores más cercanos a los obtenidos en las muestras tipo B, principalmente las reforzadas con fibras P-NC cuya diferencia de 8,5%, es similar a la que presenta la resistencia del cemento, de igual características al utilizado, en el mismo período de tiempo [20].

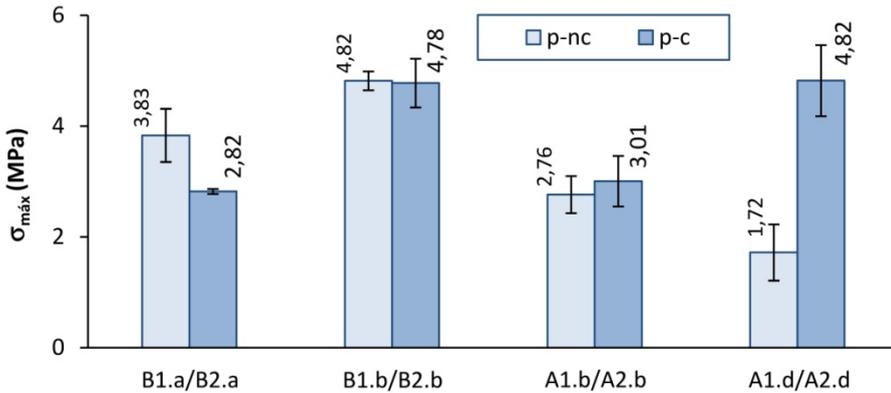
Por último, en la Figura 4.125 se representan los resultados obtenidos comparando las prestaciones de ambas fibras procedentes del corte de envases post-consumo, P-NC y P-C, en los tres tamaños utilizados en muestras de 22,5 x 5 x 1 cm<sup>3</sup> con sus variantes en cuanto a forma de obtención de las placas.

Se observa que en el tamaño de fibras 4 x 18 mm<sup>2</sup>, independientemente de la forma de obtención de la muestra (directamente o por corte), los valores de tensión alcanzado por ambas fibras son similares, con diferencias de 1% y 8% respectivamente.

Las mayores diferencias se presentan en las placas tipo A con fibras de 4 x 50 mm<sup>2</sup>, lo cual era previsible por el comportamiento de las mismas en el momento del corte de las placas.

Las fibras P-C al ser más rígidas no ofrecieron tanta resistencia la corte como las P-NC de las cuales se tuvieron que desechar algunas muestras por los daños visibles que presentaban.

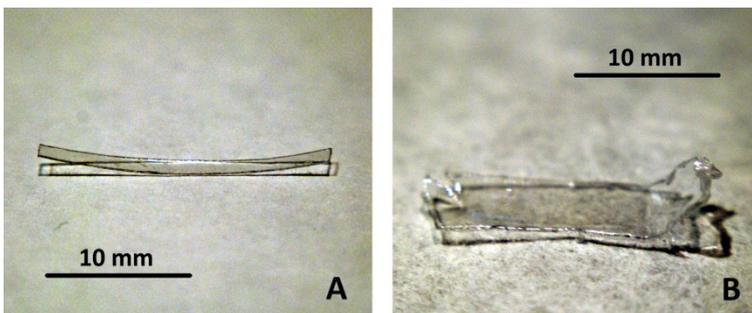
Figura 4.125 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{\text{máx}}$ ). Comparativa fibras P-NC / P-C en muestras A y B. (características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)



De estos resultados se observa que las fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$  son las que presentan mejores prestaciones desde el punto de vista resistente a flexión. Este mejor comportamiento frente a las de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  puede tener su origen en el tipo de superficie que deja cada uno de los sistemas de corte empleados en la obtención de las mismas.

En la Figura 4.126 se observan los bordes lisos, producto del corte con cizalla en las fibras de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$ , en contraposición al corte irregular y con rebabas, en las fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ , cuando se realizó con la destructora de documentos, lo cual podría favorecer la adherencia.

Figura 4.126 - Fibras P-NC  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  y  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ .  
A – corte con cizalla; B – corte con destructora de documentos.



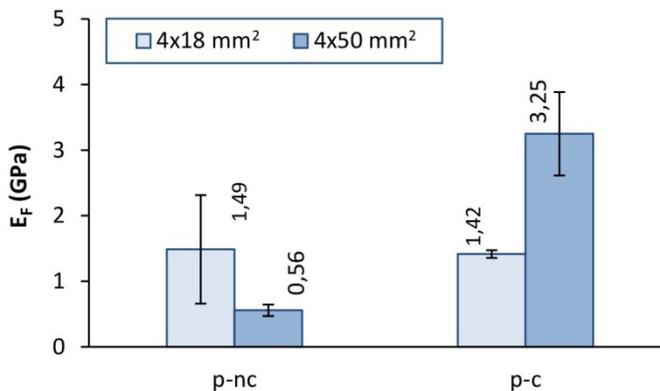
#### 4.2.5.2 Módulo elástico

A partir de las curvas tensión/deformación unitaria obtenidas en los ensayos de flexión se han determinado los módulos elásticos correspondientes a cada sollicitación según procedimiento establecido en el Capítulo 3.

Con igual criterio planteado en el punto anterior, el análisis se realiza a partir de los distintos tipos de muestras (A, B y C) incluyendo en su desarrollo los parámetros correspondientes a las fibras utilizadas.

Los resultados obtenidos en las muestras tipo A se exponen en la Figura 4.127. Similar a lo ocurrido con la resistencia a flexión, el módulo elástico de estas probetas muestra que no existe relación entre las variaciones que se producen en cada tipo de fibra según el tamaño empleado. Mientras en las fibras P-NC, al aumentar el tamaño de la misma el módulo elástico a flexión se mantiene, en las fibras P-C se incrementa casi un 600% al pasar de 18 mm a 50 mm de longitud.

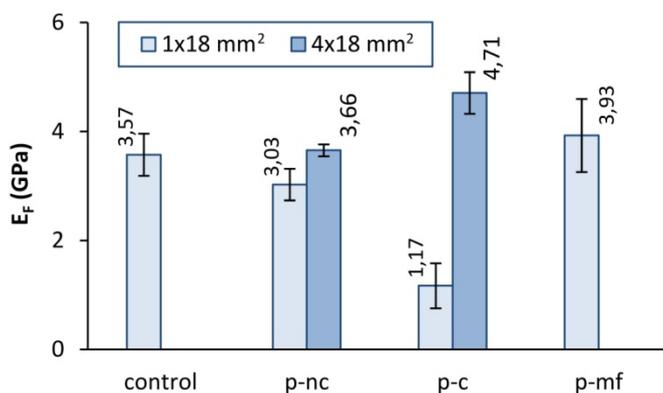
Figura 4.127 - Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo A. (tamaño  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  obtenidas por corte de placas de  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$ )



La dispersión de los resultados no ha sido constante en todas las muestras, ni siquiera siguiendo un criterio por tipo y tamaño de fibra. Como se puede apreciar, las mayores variaciones se han producido en refuerzo con fibras P-NC de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ , con un coeficiente de variación mayor al 50%, no alcanzando en las demás situaciones el 20%.

En los resultados obtenidos en las muestras tipo B (Figura 4.128) se observa la misma tendencia existente en las tensiones máximas a flexión alcanzadas, las fibras P-MF presentan un módulo elástico a flexión mayor que las fibras de 1 mm de ancho obtenidas de envases post-consumo, incluso un 10% más que el módulo elástico de la muestra control, sin reforzar.

Figura 4.128 - Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) en muestras tipo B. (tamaño 22,5 x 5 x 1 cm<sup>3</sup> realizadas en moldes de igual dimensión)

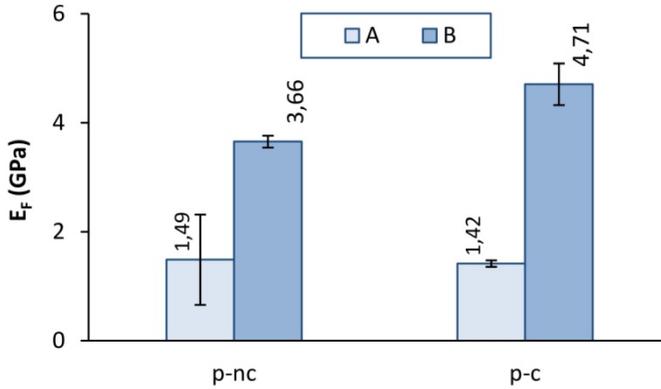


En base a estos resultados los morteros reforzados con las fibras de 1 mm de ancho de envases post-consumo producen un material compuesto más elástico a flexión que la muestra control, y las fibras de 4 mm de ancho lo opuesto, similar con las fibras de P-NC y 30% mayor al utilizar fibras provenientes de envases de bebidas carbonatadas, P-C.

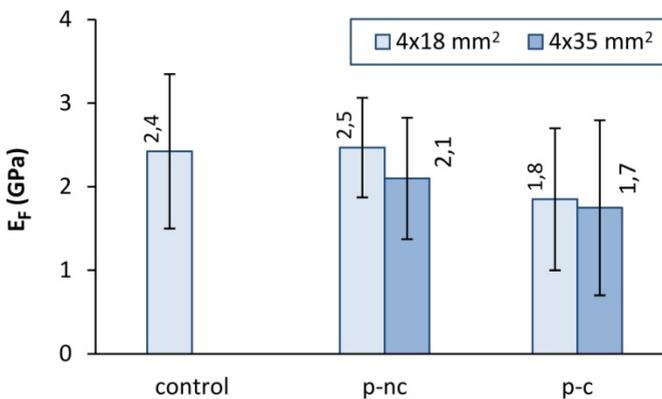
Si comparamos los resultados obtenidos en ambos tipos de muestras con las fibras de 4 mm de ancho, obtenidas mediante corte mecánico con una de las destructoras de documentos, se observa la misma tendencia que en las resistencias máximas a flexión (Figura 4.129)

Las elasticidades obtenidas en muestras que se han obtenido por corte de placas de mayor tamaño presentan un módulo elástico a flexión mucho menor que las muestras que se obtuvieron con moldes de igual tamaño.

Cercano a 250% mayor reforzando con fibras P-NC y 330% mayor con fibras P-C ponen nuevamente en duda la eficacia del sistema de obtención de muestras mediante corte, con la sierra circular utilizada.

Figura 4.129 - Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) en muestras tipo A y B. Fibras 4x18 mm<sup>2</sup>.

No obstante, al observar los resultados obtenidos en las muestras tipo C (Figura 4.130), de 24 x 24 x 1 cm<sup>3</sup>, las muestras reforzadas con fibras P-NC de 4 x 18 mm<sup>2</sup> presentan módulos de elasticidad similares a la muestra control y un 28% menos en el empleo de fibras P-C.

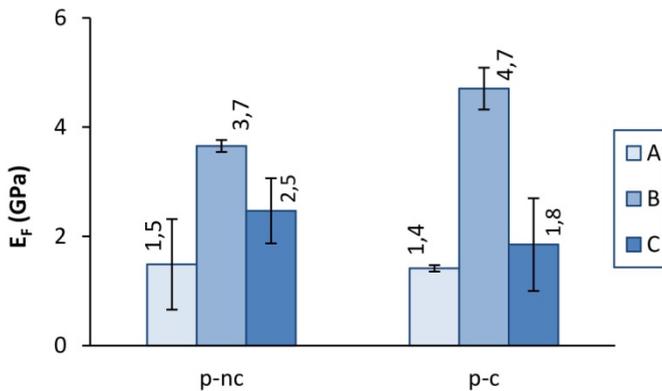
Figura 4.130 - Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) en muestras tipo C. (tamaño 24 x 24 x 1 cm<sup>3</sup> realizadas en moldes de igual dimensión)

También se puede observar que al reforzar con fibras de mayor longitud, 35 mm, las muestras son más elásticas, con módulos de elasticidad iguales o inferiores al 90% que si se refuerzan con fibras de 18 mm de longitud.

Al igual que ocurrió con la tensión máxima a flexión, en este tipo de muestras la dispersión de resultados ha sido muy alta, alcanzando el coeficiente de variación valores entre el 24% y 56%.

Analizando las prestaciones en los tres tipos de muestras, del mortero de cemento Pórtland reforzado con fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$  en (Figura 4.131), se observa que las muestras más elásticas corresponden a las tipo A, seguidas de las tipo C y por último las tipo B.

Figura 4.131 - Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) en muestras tipo A, B y C. Fibras  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ .



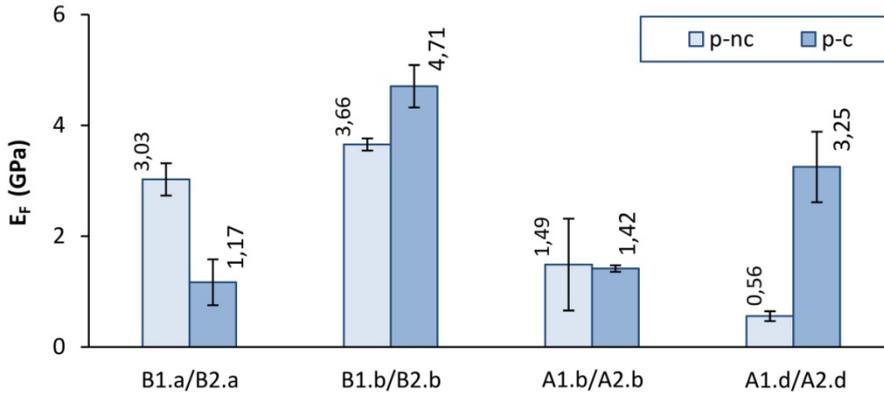
No se reconoce un patrón de comportamiento según el tipo de PET utilizado, presentando, en las muestras tipo B, mayor elasticidad realizadas con P-NC mientras con las muestras tipo C ocurre lo opuesto.

Finalmente, se realizó el análisis comparativo de los resultados obtenidos con las fibras de los dos tipos de PET, P-NC y P-C, en los tres tamaños utilizados en muestras de  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ , con sus variantes en cuanto a la forma de obtención de las placas (Figura 4.132).

Se observa que las muestras menos elásticas han resultado ser las elaboradas directamente en moldes de igual dimensión, tipo B, con mortero reforzado con de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ , en los dos tipos de PET, y las más elásticas las muestras tipo A con fibras procedentes de envases de bebidas no carbonatadas de  $4 \times 50 \text{ mm}^2$ . Dada la diferencia que presentan estas últimas con las de igual característica pero con fibras P-C se

mantiene la hipótesis de que el proceso de corte produce tensiones y microfisuras que afectan los resultados finales.

Figura 4.132 – Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ). Comparativa fibras P-NC / P-C en muestras A y B. (características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)



En el análisis general no se encuentra una coherencia entre las relaciones presentadas entre ambos tipos de PET, variando el grado de elasticidad de uno u otro según la muestra y tamaño de fibra utilizado.

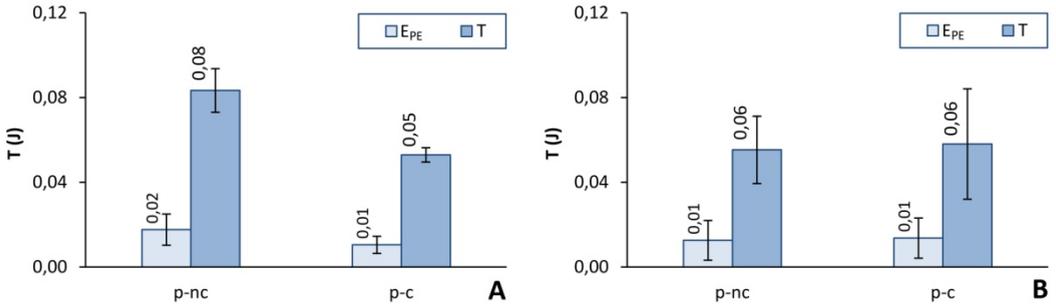
#### 4.2.5.3 Tenacidad

Como se mencionó anteriormente en las muestras prismáticas, 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 [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, y desarrollados en el punto 3.3.7.4 del Capítulo 3.

A los efectos de analizar la energía que es necesario transmitir a la muestra en su periodo elástico, se ha determinado la energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ), correspondientes a la energía que se necesita transmitir a la muestra hasta el límite elástico y sobre la cual se referencian los índices de tenacidad determinados, comparándola en cada situación con la tenacidad  $T$ , energía hasta una deformación igual a la luz entre apoyos dividido por 150.

En las Figuras 4.133 y 4.134 se exponen los resultados de estos valores, T y  $E_{PE}$  e índices de tenacidad, obtenidos en las muestras tipo A.

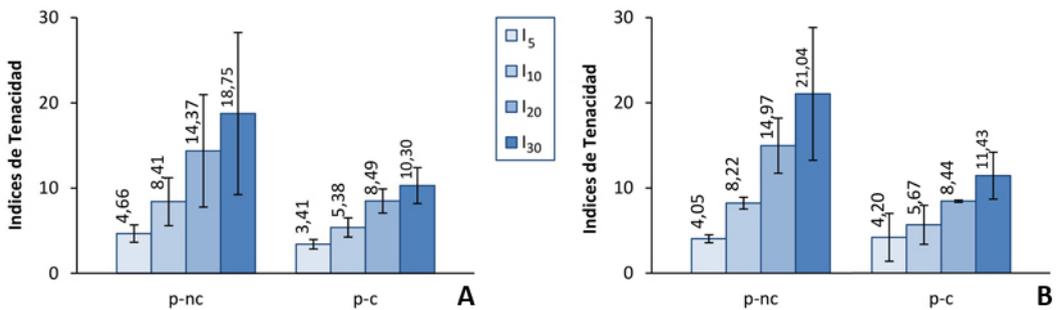
Figura 4.133 – Energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras tipo A.  
A – fibras de 4 x 18 mm<sup>2</sup>; B – fibras de 4 x 50 mm<sup>2</sup>



Se observa que al utilizar como refuerzo fibras de P-NC de 4 x 18 mm<sup>2</sup> se obtienen tenacidades 60% mayores que si las fibras son de envases de bebidas carbonatadas de igual dimensión y 33% mayores que empleando fibras de 50 mm de longitud. Con estas fibras también se ha obtenido valores de energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) 100% mayor que en las demás situaciones.

La dispersión de los resultados ha sido mayor en los valores de tenacidad a primera fisura, y, en los valores de tenacidad cuando se reforzó con fibras de 50 mm, alcanzando coeficientes de variación de 29% y 45% para el uso de las fibras P-NC y P-C respectivamente.

Figura 4.134 - Índices de tenacidad ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  e  $I_{30}$ ) en muestras tipo A.  
A – fibras de 4 x 18 mm<sup>2</sup>; B – fibras de 4 x 50 mm<sup>2</sup>



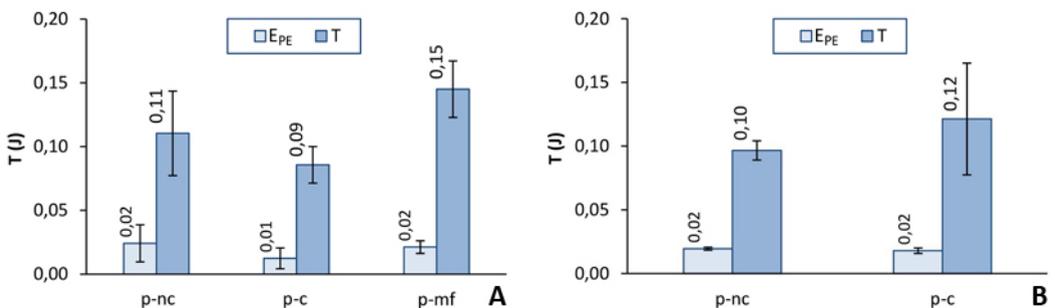
Si analizamos los índices de tenacidad se observa que en ambas dimensiones de fibras los valores son similares dentro del tipo de PET utilizado, siendo ligeramente mayor el  $I_{30}$  en las fibras de 50 mm de longitud.

Con ambas dimensiones de fibra se han obtenido índices mayores con el refuerzo de fibras provenientes de envases de bebidas sin carbonatar (P-NC). Aunque no se han alcanzado los resultados de un material elasto-plástico ideal, correspondientes al valor indicado en el índice, los valores se aproximan bastante, principalmente en los índices  $I_5$  e  $I_{10}$ .

La dispersión de los valores aumenta con la determinación de los índices, o sea cuando integramos un sector más amplio del área bajo la curva fuerza/deformación. A mayores valores de los índices, más cercanos a los valores ideales, mayor es la dispersión de datos, alcanzando coeficientes de variación de 51% en el uso de fibras P-NC de 4 mm de ancho.

Al analizar los resultados obtenidos en las muestras tipo B, cuyos valores se exponen en la Figura 4.135 y 4.136, se observa que en general todas tienen igual energía en período elástico ( $E_{PE}$ ) excepto las fibras de P-C de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  que presenta el 50% de las restantes.

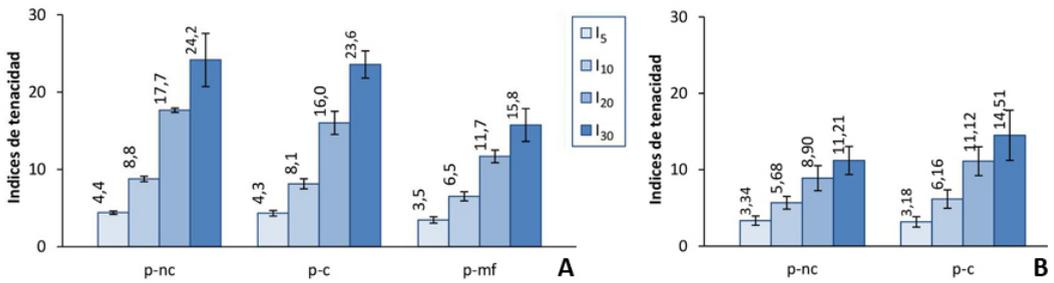
Figura 4.135 – Energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras tipo B.  
A – fibras de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  y P-MF de 18 mm de longitud ; B – fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$



La tenacidad presentada por los distintos tipos de materiales es variable, siendo las muestras más tenaces las reforzadas con fibras multifilamento, P-MF, que superan en 36% y 67% la tenacidad alcanzada por las fibras de 1 mm de ancho de P-NC y P-C respectivamente, y en 25% y 50% a las mismas con sección de 4 mm de ancho.

La dispersión es variable, alcanzando valores de 8% hasta 36%, extremos que se presentan en las muestras reforzadas con fibras de 4 mm de ancho.

Figura 4.136 - Índices de tenacidad ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  e  $I_{30}$ ) en muestras tipo B. A - fibras de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  y P-MF de 18 mm de longitud ; B - fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$



Analizando los índices de tenacidad se observa que todas las muestras han alcanzado deformaciones iguales a 15,5 veces la deformación a primera fisura, mostrando incrementos graduales en los coeficientes determinados.

Las muestras que presentan índices más cercanos a los valores de un material elasto-plástico ideal corresponden a las reforzadas con fibras obtenidas de envases post-consumo de 1 mm de ancho, P-NC y P-C.

Los coeficientes de variación determinados son inferiores al 25% siendo, en general, menores para las muestras reforzadas con fibras de 1 mm de ancho y multifilamento.

En la Tabla 4.16 se representan los valores de energía determinados para las muestras con secciones similares, tipo A y tipo B, reforzados con fibras obtenidas de envases post-consumo, P-NC y P-C, de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$ .

Se observa que en las muestras tipo B, los valores de tenacidad determinados superan en 25% y 140% a los datos observados en las muestras tipo A, para fibras P-NC y P-C, respectivamente.

En los índices de tenacidad no se observa igual tendencia. Los mayores valores se dan alternados en una muestra y otra según tipo de fibra, siendo mayores, en general, los que corresponden a la muestra tipo A para fibras P-NC y a la muestra tipo B para fibras P-C.

En general los coeficientes de variación (C.V.) son menores al 25% excepto en las muestras tipo A con fibras P-NC que a partir del índice 10 ( $I_{10}$ ) presentan valores entre 33% y 51%.

Tabla 4.16 - Tenacidad (T) e índices de tenacidad ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  e  $I_{30}$ ) para muestras tipo A y B.  
Fibras 4 x 18 mm<sup>2</sup>.  
(C.V. = coeficiente de variación)

muestra	fibra	T (J)	$I_5$	$I_{10}$	$I_{20}$	$I_{30}$
A	p-nc	0,08	4,66	8,41	14,37	18,75
	C.V.	12%	22%	33%	46%	51%
	p-c	0,05	3,41	5,38	8,49	10,30
	C.V.	6%	16%	21%	17%	20%
B	p-nc	0,10	3,34	5,68	8,90	11,21
	C.V.	8%	18%	15%	18%	16%
	p-c	0,12	3,18	6,16	11,12	14,51
	C.V.	36%	21%	20%	17%	23%

Los valores determinados en las muestras tipo C, en cuanto a valor de energía, no son comparables con las muestras anteriores dado que su sección es casi 5 veces mayor. Por tal motivo su análisis comparativo solo se podrá realizar a nivel de índices de tenacidad al ser magnitudes adimensionales.

En la Figura 4.137 se grafican los resultados de tenacidad obtenidos para este tipo de placas, C, así como la energía en el período elástico de las mismas. La primera diferencia que se observa respecto a los tipos de placas anteriores, refiere a que las muestras control alcanzaron deformaciones iguales o mayores a la requerida para determinar su tenacidad según norma.

Los mayores valores de tenacidad se encuentran en las muestras reforzadas con fibras P-NC, en las dos dimensiones utilizadas: 4 x 18 mm<sup>2</sup> y 4 x 35 mm<sup>2</sup>, mayores en 34% y 9% respecto a las fibras P-C de igual dimensión.

En general los coeficientes de variación son próximos al 30%, lo cual muestra una gran dispersión de resultados. Analizando más detalladamente se compararon los resultados

obtenidos en los dos sentidos de ensayo (S1 y S2), a semejanza del estudio de resistencia a flexión (Figura 4.138)

Figura 4.137 - Energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) y tenacidad ( $T$ ) en muestras tipo C. (tamaño  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)

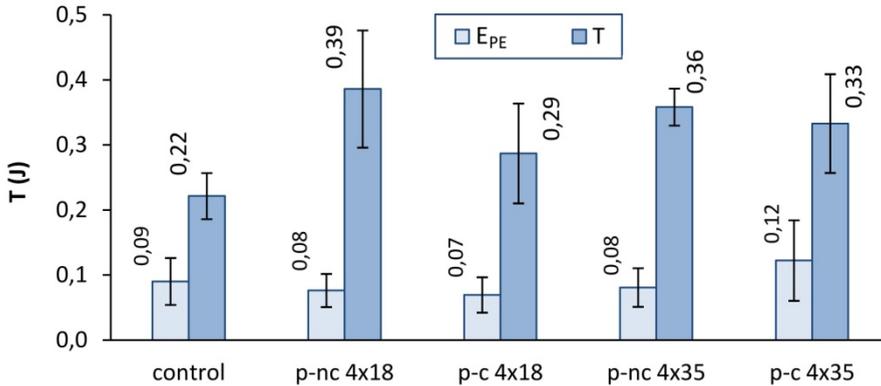
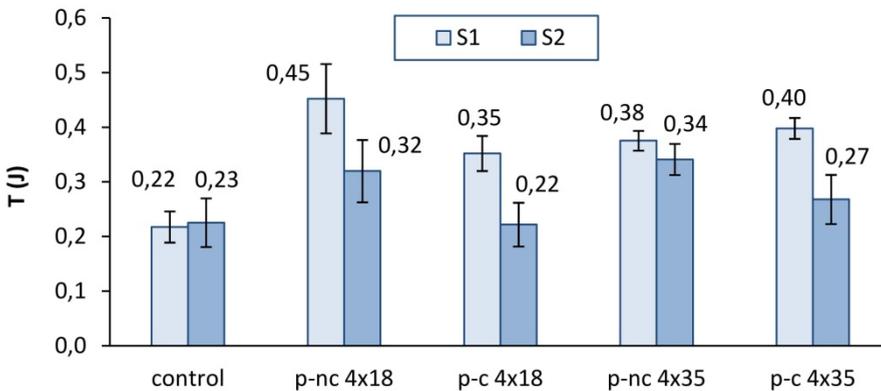


Figura 4.138 – Tenacidad ( $T$ ) en muestras tipo C, comparación de ambos sentidos. (tamaño  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)



Los datos obtenidos presentan para la muestra control valores similares en ambas direcciones, no ocurriendo de igual forma con las muestras fibro-reforzadas. En general, las diferencias de valores en ambos sentidos para estas muestras superan el 40%, siendo mayor el que corresponde a la sección perpendicular al sentido principal de vibrado. Esa

diferencia disminuye a 12% solo en las muestras reforzadas con fibras P-NC de 35 mm de longitud.

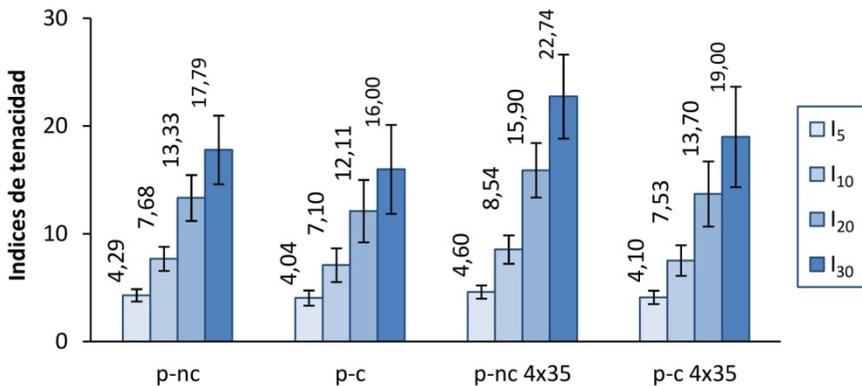
Los porcentajes de desviación de resultados se distribuyen, en general, equitativamente entre ambas direcciones mostrando una distribución bastante homogénea del material.

Este análisis nos permite pensar que, de las dos hipótesis realizadas sobre la variación entre ambos sentidos, la más probable es la que refiere a una orientación de las fibras producida por el sistema de vibrado empleado.

Observando los resultados obtenidos en los índices de tenacidad, Figura 4.139, en estas muestras también podemos ver que los valores mantienen una cierta progresión, alcanzando los máximos las muestras reforzadas con fibras P-NC de 35 mm de longitud.

Los valores en los índices menores,  $I_5$  e  $I_{10}$ , se aproximan a los valores para un material elasto-plástico ideal, siendo menores en 25% y 30% en los superiores,  $I_{20}$  e  $I_{30}$ .

Figura 4.139 - Índices de tenacidad ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  e  $I_{30}$ ) en muestras tipo C. (tamaño  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)



En la dispersión de datos se encuentra la misma tendencia que se mencionó en las muestras tipo B, a mayor deformación los valores se distribuyen más alejados de la media produciendo coeficientes de variación de 18% a 26% en los índices  $I_{30}$ .

#### 4.2.5.4 Impacto

Siguiendo el procedimiento indicado en el Capítulo 3, punto 3.3.7.5., se realizó el ensayo de caída de peso adaptado del Ensayo L 4.7.20 propuesto en el manual de ECOSUR para tejas de micro concreto (TMC) [49].

Los valores obtenidos no son cuantitativos, solamente nos permite comparar los resultados obtenidos con la placa control y entre muestras reforzadas con diferentes fibras.

Los valores medios de impactos para producir la primera fisura y la rotura de las placas se exponen en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 - Resistencia a impacto. Número de impactos a primera fisura y a rotura. (características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)

	<b>C.0</b>	C.V.	<b>C.1b</b>	C.V.	<b>C.1c</b>	C.V.	<b>C.2b</b>	C.V.	<b>C.2c</b>	C.V.
<b>1ª fisura</b>	1,3	40%	8,8	29%	10,8	53%	20,4	20%	14,0	48%
<b>rotura</b>	2,3	22%	41,8	30%	23,0	58%	65,6	45%	46,0	26%

Se observa que todas las placas fibro-reforzadas resisten más impactos que la muestra control, C.0, superando su valor entre 6,7 y 15,7 veces más en los que necesarios para producir la primera fisura y 10 a 28,5 veces más en los que producen la rotura.

Si valoramos las prestaciones por los impactos que producen la primera fisura y la rotura observamos que las muestras elaboradas con fibras P-C de 4 x 18 mm<sup>2</sup>, C.2b, son las que requieren mayor número.

Sin embargo, en cuanto al mínimo número de impacto las muestras no coinciden para ambos parámetros. Para producir la primera fisura el mínimo se obtiene en las muestras reforzadas con fibras P-NC de 4 x 18 mm<sup>2</sup> y para la rotura en las muestras con igual tipo de fibra pero de 35 mm de longitud.

Dada la dispersión de resultados, si en vez de relacionar los valores medios comparamos los mínimos obtenidos para cada tipo de placa con los de la placa control, observamos que en todas las situaciones los valores son superiores, con ganancias importantes frente a este tipo de sollicitación (Figuras 4.140 y 4.141).

Figura 4.140 - Número de impactos para producir la primera fisura. Máximos y mínimos.  
(características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)

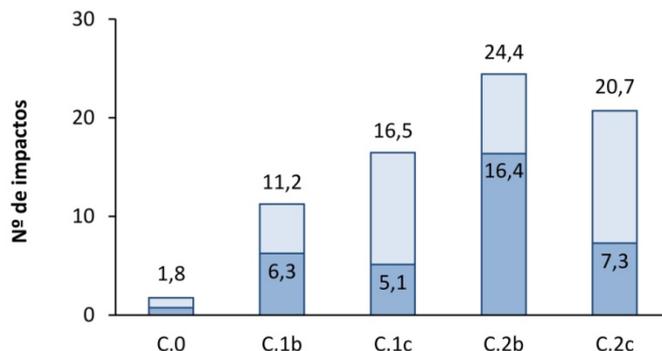
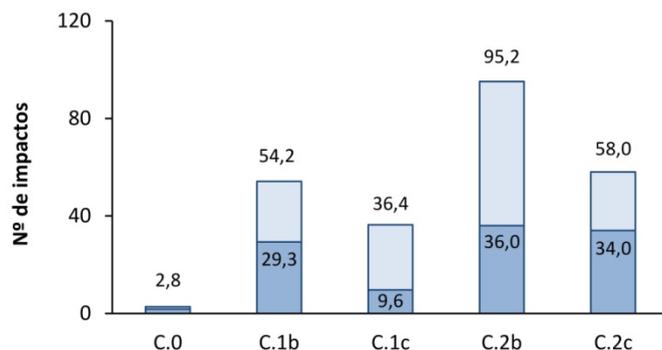


Figura 4.141 - Número de impactos para producir la rotura. Máximos y mínimos.  
(características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)



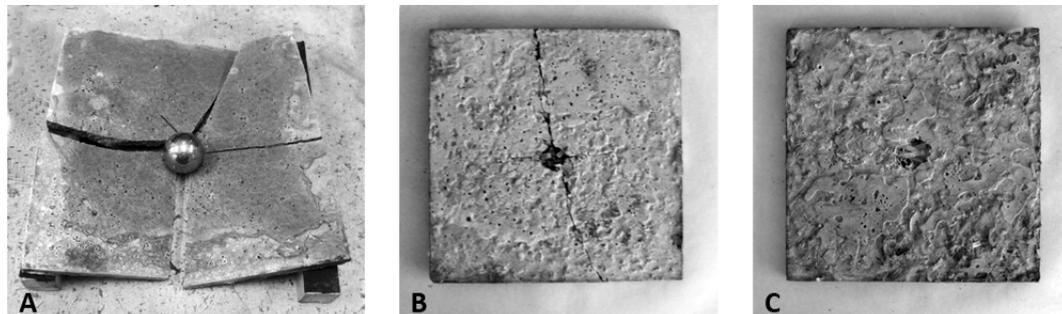
En el manual mencionado [49] el número mínimo de impactos deseables para una teja es uno, por lo que todas las muestras, incluyendo la muestra control, superan esa condición.

Además de evaluar el número de impactos en cada tipo de muestra, la observación que se ha realizado durante el ensayo es el tipo de rotura que se produce en cada una de ellas.

En la Figura 4.142 se exponen, a modo de ejemplo, las imágenes adquiridas detrás el ensayo para una de las muestras control (C.0), una muestra con fibras P-NC de 18 mm de longitud (C.1b) y una muestra con fibras P-NC de 35 mm de longitud.

Figura 4.142 - Ensayo de Impacto. Tipo de rotura según dimensión de fibra.

A – muestra control; B - muestra tipo C.1; C – muestra tipo C.2



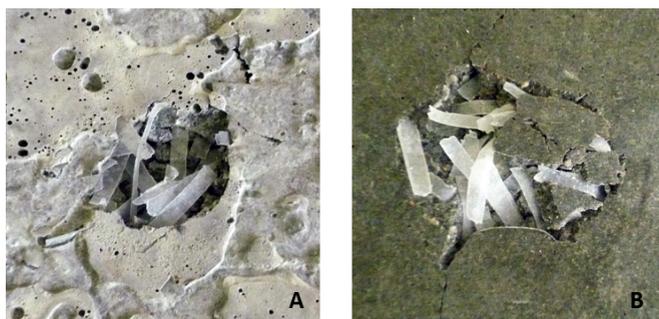
Se observó que la muestra control tuvo una rotura frágil, sin deformación previa, quedando fragmentada en trozos de número y dimensión variable según la muestra.

En las muestras con fibras de 18 mm de longitud, se produce la ruptura de la matriz, con fragmentación parcial o total de la pieza, posterior a una acentuada deformación tras la primera fisura, concentrando los daños en el punto de impacto.

Sin embargo, en las muestras reforzadas con fibras de 35 mm de longitud la ruptura se concentra en el punto de impacto de la bola, con desprendimiento de la matriz en esa zona, quedando expuestas las fibras en forma de trama (Figura 4.143).

Figura 4.143 - Ensayo de impacto. Rotura en muestras tipo C.2.

A – superficie de impacto; B – superficie opuesta al impacto



#### 4.2.6 Características mecánicas de probetas laminares de matriz mixta

Esta parte de la investigación se basa en los resultados de tenacidad obtenidos en las muestras producidas con matriz de cemento Pórtland reforzadas fibras P-NC de 4 x 18 mm<sup>2</sup> y la baja degradación en estas fibras al estar inmersas en una matriz mixta de cemento Pórtland y ceniza volante (punto 4.1.4.4.).

Se elaboraron muestras iguales a las tipo B, de dimensiones 22,5 x 5 x 1 cm<sup>3</sup>, con mortero de matriz mixta conteniendo 60% de cemento Pórtland y 40% de ceniza volante reforzado con 4% del volumen total de fibras P-NC de 4 x 18 mm<sup>2</sup>, sustituyendo igual porcentaje de árido.

Asimismo, se le aplicaron diferentes procedimientos y edades de curado según lo expuesto en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 - Muestras tipo D. Características físicas y de curado.

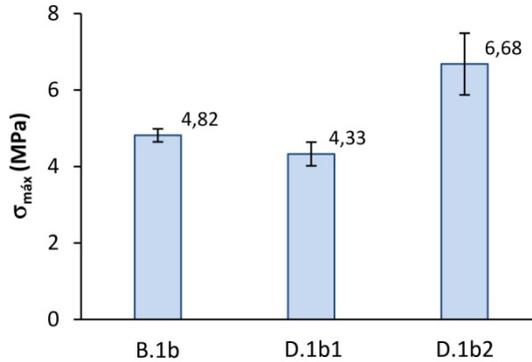
muestra	Dimensión (cm <sup>3</sup> )	tamaño fibra (mm <sup>2</sup> )	curado en cámara	curado en baño a 45 °C
<b>D.1b1</b>	22,5 x 5 x 1	4 x 18	28	-----
<b>D.1b2</b>	22,5 x 5 x 1	4 x 18	28	28

Con el fin de comparar las prestaciones se analizaron los resultados con las muestras B.1b analizadas en el punto anterior, que corresponden a placas realizadas con igual procedimiento, diferenciándose solamente por el tipo de matriz utilizada.

Se aplicó igual procedimiento de análisis: a partir de los datos obtenidos del ensayo a flexión de 4 apoyos se determinaron resistencia máxima a flexión, módulo elástico a flexión, tenacidad e índices de tenacidad.

En la Figura 4.144 se grafican los resultados obtenidos en cuanto a las resistencias máximas a flexión. Se observa que la resistencia de la matriz mixta aumenta un 54% al exponerla 28 días a baño de 45 °C después del curado en cámara húmeda, lo cual se corresponde con el aumento de resistencia de matrices con ceniza volante, curadas a 40 °C, determinado en el trabajo realizado por J. Payá y colaboradores [50].

Figura 4.144 - Resistencia máxima a flexión ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC.  
(características de las muestras indicadas en Tabla 4.18)

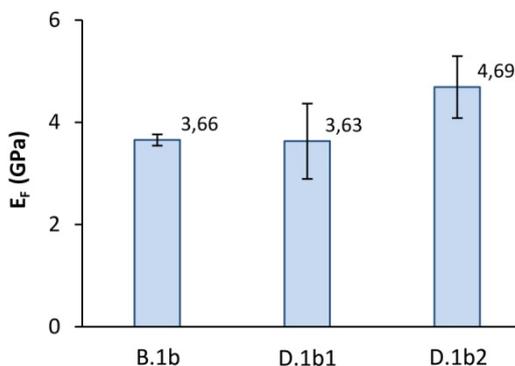


Asimismo, la tensión máxima obtenida con la matriz mixta fibro-reforzada presenta valores 10% menores que las muestras realizadas con matriz de cemento Pórtland en iguales condiciones de curado.

En general, la dispersión de los resultados está dentro de parámetros aceptables, con coeficientes de variación inferiores a 10%.

Si analizamos el módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) se observa que, ante iguales condiciones de curado, no existen diferencias si se utiliza una matriz u otra (Figura 4.145).

Figura 4.145 . Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC.  
(características de las muestras indicadas en Tabla 4.18)

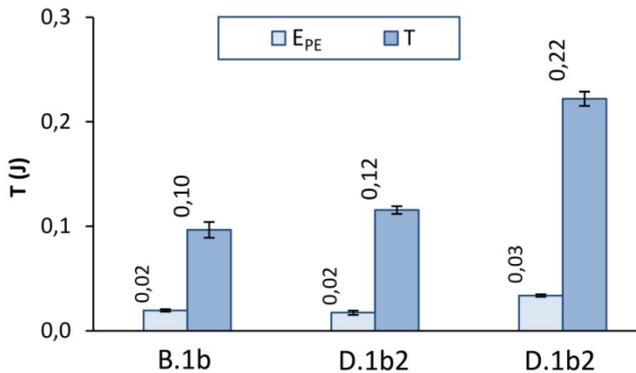


Sin embargo, la exposición durante 28 días a temperatura de 45 °C ha hecho aumentar el módulo elástico a flexión cerca de 30%, transformándose en un material compuesto menos elástico.

El coeficiente de variación presentado en estos datos es mayor, 20%, lo que implica una mayor dispersión de los valores individuales respecto al valor medio.

En la Figura 4.146 se exponen los valores obtenidos en la determinación de la energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) y de la tenacidad ( $T$ ) determinados con el procedimiento mencionado en el punto 3.3.7.3 y 3.3.7.4, respectivamente.

Figura 4.146 - Energía en período elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad ( $T$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC.  
(características de las muestras indicadas en Tabla 4.18)



Estos resultados muestran la misma relación presentada en el módulo elástico, valores similares ante iguales condiciones de curado utilizando ambas matrices y un incremento, en este caso del 80%, de la muestra con matriz mixta que ha sido curada 28 días en baño frente a la que sólo se mantuvo en el ambiente controlado de la cámara húmeda.

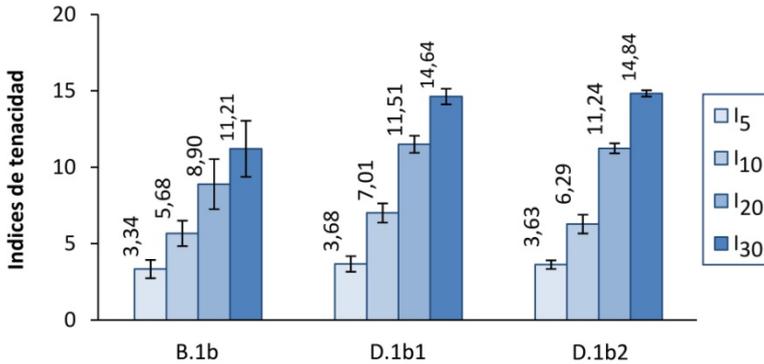
Asimismo se observa que las variaciones respecto a la media son bajas, con coeficientes de variación de 3% para las muestras con matrices mixtas y 8% con matriz de cemento Pórtland.

Estas diferencias no se observan en los índices de tenacidad determinados (Figura 4.147) los cuales no muestran diferencias sustanciales entre muestras con matriz mixta. Se

observa que la utilización de una temperatura de curado de 45 °C no ha producido diferencias significativas.

Figura 4.147 - Índices de tenacidad ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$  e  $I_{30}$ ) en muestras de matriz mixta reforzada con fibras P-NC.

(características de las muestras indicadas en Tabla 4.18)



Si comparamos los índices obtenidos para ambas matrices en iguales condiciones de curado, encontramos que la sustitución del 40% de cemento Pórtland por ceniza volante ha producido incrementos que van aumentando del 10% al 30%, presentando la mayor diferencia en los valores de índice 30 ( $I_{30}$ ).

### 4.3 Referencias Bibliográficas

- [1] AENOR, "UNE-EN 14889-2:2008 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Deficiones, especificaciones y conformidad.," ed, 2008.
- [2] Sivaraja, M, Kandasamy, S. y Thirumurugan, A., "Mechanical strength of fibrous concrete with waste rural materials," Journal of Scientific & Industrial Research, vol. 69, pp. 308-312, 2010.
- [3] Bentur, A. y Mindess, S., Fibre Reinforced cementitious Composites: Taylor & Francis, 2006.
- [4] Badía Valiente, J.D., "Strategies and analytical procedures for a sustainable plastic waste management. An application to poly (ethylene terephthalate) and polylactide in the packaging sector," Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2011.
- [5] AENOR, "UNE-EN 196-1:2005 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas," ed, 2005.
- [6] EHE-08, "Instrucción de Hormigón Estructural," ed, Ministerio de Fomento, Madrid 2008.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Brandt, A., *Cement based composites - 2nd ed.: Materials, Mechanical Properties and Performance*: Taylor & Francis, 2009.
- [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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Purnell, P., Short, N.R., Page, C.L., Majumdar, A.J. y Walton, P.L., "Accelerated ageing characteristics of glass-fibre reinforced cement made with new cementitious matrices," *Composites: Part A*, vol. 30, pp. 1073-1080, 1999.
- [22] Purnell, P., Cain, J., Van Itterbeeck, P. y Lesko, J., "Service life modelling of fibre composites: A unified approach," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 3330-3336, 2008.
- [23] Litherland, K.L., Oakley, D.R. y Proctor, B.A., "The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites," *Cement and Concrete Research*, vol. 11, pp. 455-466, 1981.
- [24] 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.

- [25] 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.
- [26] Zornoza Gómez, E.M., "El papel del catalizador usado de Craqueo Catalítico (FCC) como material Puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón.," Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2007.
- [27] Gener Rizo, M. y Alonso Lavernia, J. M., "The influence of natural pozzolana mineralogical composition in the properties of blended cement," *Materiales de Construcción*, vol. 52, pp. 73-77, 2002.
- [28] Puertas, F. , García-Díaz, I. , Barba, A. , Gazulla, M.F. , Palacios, M. , Gómez, M.P. y Martínez-Ramírez, S., "Ceramic waste as alternative raw materials for Portland cement clinker production," *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, pp. 798-805, 2008.
- [29] Méndez Mutschler, R., "DISEÑO DE TEJAS PREFABRICADAS DE BAJO COSTE QUE INCORPORAN RESIDUOS INDUSTRIALES DE CARÁCTER PUZOLÁNICO PARA USO EN PAÍSES EN VIAS DE DESARROLLO. APLICACIÓN AL CASO DE CALI (COLOMBIA).", Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2009.
- [30] RESTREPO GUTIÉRREZ, J. C., RESTREPO BAENA, O. J. y TOBÓN, J. I., "Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland," *DYNA*, vol. 73, pp. 131-141, 2006.
- [31] Frías Rojas, M. y Cabrera, J., "The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin–lime–water systems," *Cement and Concrete Research* 32, pp. 133-138, 2002.
- [32] Klimesch, D.S. y Ray, A., "Hydrogarnet formation during autoclaving at 180 °C in unstirred metakaolin-lime-quartz slurries," *Cement and Concrete Research*, vol. 28, pp. 1109-1117, 1998.

- [33] Ríos, C.A., Williams, C.D. y Fullen, M.A., "Hydrothermal synthesis of hydrogarnet and tobermorite al 175 °C from kaolinite and metakaolinite in the CaO-Al<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system. A comparative study," *Applied Clay Science* 43, pp. 228-237, 2009.
- [34] Torres, J., Mejía de Gutiérrez, R., Castelló, R. y Vizcayno, C., "Proceso de hidratación de pastas de OPC adicionadas con caolín tratado térmicamente," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquía*, 2008.
- [35] ASTM, "ASTM C 1560-03 Standard test method for hot water accelerated aging of glass-fiber reinforced cement-based composites.," ed, 2003.
- [36] 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.
- [37] Payá, J, Monzó, J, Borrachero, M.V y Velázquez, S, "Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 603-609, 2003.
- [38] 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.
- [39] Naaman, A. E., *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2: Proceedings of the International Workshop*. Cap. 5 Fiber-matrix interfaces: Taylor & Francis, 1996.
- [40] Bentur, A., "Role of interfaces in controlling durability of fiber-reinforced cements," *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 2-7, 2000.
- [41] Pacios, A. ; Fernández Cánovas, M., "Estudio de la interfase en los hormigones reforzados con fibras," *Materiales de Construcción*, vol. 47, pp. 247-248, 1997.
- [42] 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.

- [43] Wang, Youjiang, Li, Victor C. y Backer, Stanley, "Modelling of fibre pull-out from a cement matrix," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 10, pp. 143-149, 1988.
- [44] Li, Cheng Yu y Mobasher, Barzin, "Finite Element Simulations of Fiber Pullout Toughening in Fiber Reinforced Cement Based Composites," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 7, pp. 123-132, 1998.
- [45] Yang, Qing-Sheng, Qin, Qing-Hua y Peng, Xi-Rong, "Size effects in the fiber pullout test," *Composite Structures*, vol. 61, pp. 193-198, 2003.
- [46] Kim, J. K. y Mai, Y. W., *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*: Elsevier Science, 1998.
- [47] Harris, B., *Engineering composite materials*: IOM, 1999.
- [48] AENOR, "UNE-EN 12467:2006 Placas planas de fibrocemento. Especificaciones del producto y métodos de ensayo," ed, 2006.
- [49] Meléndez, M., Espinosa, O., Rhyner, K. y Noboa, M., "Un techo que cubre al mundo: la Teja de MicroConcreto TMC," ECOSUR ed, 2004.
- [50] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Peris-Mora, E. y Amahjour, F., "Mechanical treatment of fly ashes: Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 543-551, 2000.

# 5 CONCLUSIONES GENERALES



Analizando y evaluando los resultados experimentales obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones en relación al refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo:

- ✓ Respecto a la caracterización de los materiales residuales utilizados para la elaboración de fibras, se observa que todos tienen un bajo módulo elástico y resistencias mecánicas a tracción medias y bajas (8,7 a 144.8 MPa). Esto hace que su empleo se recomiende para refuerzo de matrices utilizadas en la elaboración de elementos constructivos que requieren tenacidad más que resistencia.
- ✓ La degradación que los productos de hidratación del cemento producen en las fibras elaboradas con estos materiales ha sido variable. Se ha podido observar que el hidróxido cálcico presente en matrices de cemento portland, y al que la bibliografía considera causante de la degradación, no es el único factor de la misma. Las superficies de las distintas fibras que han estado en contacto con matrices cementicias, al ser observadas mediante SEM, no muestran un patrón único de degradación.
- ✓ Al adicionar puzolanas al cemento Pórtland, y aún en porcentajes suficientes para combinarse con todo el hidróxido cálcico presente, las fibras continúan presentando signos de degradación. Asimismo, la adición de cada puzolana ha tenido un efecto diferente en cada fibra, no detectándose una que presente los mejores resultados en todos los residuos, ni siquiera cuando se parte del mismo material como es en el caso de envases post-consumo de PET.

- ✓ Los ensayos a tracción de las fibras de PET, tras la exposición a pasta de cemento Pórtland durante 14 meses, han mostrado una disminución importante de resistencia en condiciones de ambiente controlado (cámara húmeda a  $20 \pm 1$  °C y humedad  $\geq 90\%$ ), 27% menos que la fibra virgen y 36% menos que la fibra expuesta solamente 28 días en iguales condiciones. Si bien esto demuestra que existe una degradación en la fibra, no nos permite asegurar que el material compuesto tenga la misma tendencia decreciente de resistencias.
- ✓ Asimismo, el incremento de resistencia a tracción y la alta dispersión de resultados de las mismas fibras expuestas a pasta de cemento y curadas a una temperatura de 45 °C plantean la incertidumbre de si este procedimiento de curado no es el causante de defectos puntuales y por lo tanto puede no ser el adecuado para este tipo de materiales.
- ✓ Respecto al material compuesto, los resultados obtenidos en este trabajo muestran que no es desacertado pensar que fibras obtenidas directamente del reciclaje de los envases de plástico post-consumo puedan ser empleadas para producir morteros u hormigones fibro-reforzados (FRM y FRC respectivamente).
- ✓ Se demuestra que, en la búsqueda por producir fibras mediante procedimientos de corte sencillo, la forma de hacerlo es un factor importante, incluso más que la relación de aspecto de las mismas fibras.
- ✓ Observando los resultados a flexión obtenidos en los elementos laminares de  $22.5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ , se observa que las fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$  permiten obtener valores mayores de resistencia a flexión que con fibras de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$ . Ello se puede justificar por el tipo de superficie que deja cada uno de los sistemas empleados: el corte irregular y con rebabas utilizando como sistema de corte la destructora de documentos en contraposición con el corte liso producto de la cizalla. En el primer caso se obtienen mejores resultados a flexión con los dos tipos de fibras provenientes del corte de envases post-consumo de PET, de bebidas carbonatadas y de bebidas sin carbonatar.
- ✓ Asimismo, se concluye que la forma de obtener las probetas influye en los resultados, habiéndose alcanzado, con las probetas laminares tipo B ( $22.5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ ), resistencias mayores que en las tipo A (preparadas por corte de una placa

de mayor tamaño) pese a tener ambas igual dimensión final. El corte de elementos laminares ha producido fisuras en las probetas y arrancamiento de fibras, principalmente las de mayor longitud, hasta el punto de tener que descartar algunos ejemplares.

- ✓ Por otra parte, la diferencia de valores en los dos sentidos de ensayo a flexión observada en las placas tipo C,  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$ , hace pensar que este fenómeno se puede utilizar a nuestro favor si lo empleamos como sistema de orientación de las fibras pero, en caso de no ser ese nuestro objetivo, se debe buscar un sistema de compactación que no lo produzca.
- ✓ La ganancia de tenacidad obtenida en estas placas de tipo C, respecto a la matriz sin reforzar, muestran que efectivamente las fibras de PET están trabajando como refuerzo produciendo un material compuesto apto para elementos constructivos que requieran una ruptura con cierto grado de ductilidad.
- ✓ Respecto a la resistencia a impacto se obtienen inferiores resultados cuando las fibras son de menor longitud, 18 mm, a pesar de que el tipo de rotura que se produce con las mismas es una fractura lineal frente a una perforación localizada para las fibras de mayor longitud, 35 mm. Sin embargo, en esas mismas muestras y desde el punto de vista de la tenacidad, las fibras que arrojaron mejores resultados corresponden a las de mayor longitud, 35 mm, realizadas con PET proveniente de envases post-consumo de bebidas sin carbonatar, P-NC.
- ✓ Respecto al tipo de matriz utilizada, se concluye que la utilización de ceniza volante como adición y con un curado a temperatura de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  es una opción válida para aumentar la resistencia a flexión y tenacidad, pero convierte al material en menos elástico. Asimismo la utilización de esta puzolana es la que permitió obtener menores signos de degradación en las fibras utilizadas para su refuerzo, concretamente fibras de PET provenientes de envases post-consumo sin carbonatar.
- ✓ Estos resultados reafirman la idea que la obtención de fibras por corte mecánico de envases post-consumo de PET es un procedimiento viable para la elaboración de morteros u hormigones de matriz de cemento que integren elementos

constructivos sometidos a flexión o requieran una mayor elasticidad y grado de tenacidad ante las acciones actuantes, sobre todo orientado a países en vías de desarrollo donde este residuo es un excedente que conlleva problemáticas medioambientales.

### Futuras líneas de investigación.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, tanto en la etapa preliminar como en la profundización con PET, queda demostrado el potencial que tienen estos residuos sintéticos para constituirse en refuerzo de materiales con matrices cementicias lo cual justifica la motivación por seguir profundizando su estudio.

Quedan así planteadas varias líneas de investigación referentes a los materiales residuales sobre los que solamente se realizó un análisis preliminar: envases post-consumo de bebidas lácteas y residuos provenientes de servicios de telecomunicaciones.

En ellos ha quedado pendiente todo lo referente a la determinación de longitudes críticas, adherencia y definir para qué elementos constructivos presentan el mejor desempeño.

Para estos materiales es necesario definir líneas de investigación específicas que contemplen sus características materiales así como los resultados obtenidos en la primera parte de este trabajo como fibro-refuerzo de matrices cementicias.

Respecto a las fibras obtenidas de envases post-consumo de PET, las futuras líneas de investigación deberían estar centradas, principalmente, en los aspectos de durabilidad del material compuesto y su empleo de dichas fibras en mezclas que utilicen áridos de mayor tamaño (micro-hormigón u hormigón).

Es prioritario realizar también estudios de resistencia a largo plazo previendo las futuras condiciones de elaboración, evaluando la influencia de la temperatura ambiente en las distintas épocas del año, de la temperatura de ambiente controlado o a altas temperaturas con la inmersión en baños. Asimismo, en base a los resultados obtenidos en este trabajo, se deberá profundizar en el efecto resistente que produce la adición de distintas puzolanas en el material compuesto.

En cuanto a la aplicación de estos materiales compuestos, también se deberá realizar el estudio de su aplicación en elementos constructivos con ensayos a escala de uso: paneles de revestimiento interior y/o exterior, elementos de cubierta, elementos estructurales con requerimientos de absorción de energía como pueden ser aquellos sometidos a fenómenos naturales (seismos, tornados, etc.)

Paralelamente, se deberán realizar aquellos estudios que refieran a cumplir condiciones de seguridad y conservación:

- ✓ impermeabilidad
- ✓ agua caliente
- ✓ inmersión/secado
- ✓ hielo/deshielo
- ✓ calor/lluvia
- ✓ permeabilidad al vapor de agua
- ✓ resistencia al fuego
- ✓ emisión de sustancias peligrosas
- ✓ fluencia-fatiga

Finalmente, desde un ámbito más medioambiental, sería deseable realizar estudios del impacto que puede tener el uso de este tipo de materiales y los procedimientos de reciclado de futuras demoliciones que contengan estos compuestos.



# GLOSARIO



# GLOSARIO

a	ancho de la sección en contacto con los platos de compresión
$a_{Fe}$	ancho de la fibra embebida en la matriz
A	alúmina
ACH	aluminato cálcico hidratado
$Al_2O_3$	óxido de aluminio
b	largo de la sección en contacto con los platos de compresión
$C_2S$	silicato bicálcico o "belita"
$C_3S$	silicato tricálcico o "alita"
$Ca(OH)_2$	hidróxido de calcio
$CaCl_2$	cloruro de calcio
CaO	óxido de calcio
CH	portlandita
CP	cemento Pórtland
$CO_2$	dióxido de carbono
CW	residuo cerámico (ceramic waste)

C.V.	coeficiente de variación
d	espesor de la sección en probetas prismáticas
DS	desviación estándar
$\varepsilon$	alargamiento en mm/mm
E	módulo de elasticidad
$E_t$	módulo elástico a tracción
$E_f$	módulo elástico a flexión
$E_c$	módulo elástico a compresión
e	espesor en fibras
$e_{Fe}$	espesor de la fibra embebida en la matriz
$\phi$	diámetro
$\phi_e$	diámetro equivalente
$\phi_{int}$	diámetro interior
$\phi_{ext}$	diámetro exterior
FA	ceniza volante (fly ash)
FCC	residuo de catalizador de craqueo catalítico (fluid catalytic cracking)
$F_{Cm\acute{a}x}$	fuerza máxima obtenida en el ensayo de compresión
$Fe_2O_3$	óxido de hierro
$F_{m\acute{a}x}$	fuerza máxima obtenida en el ensayo realizado
FO	fibra óptica
FP-FO	funda de protección exterior en el cableado de fibra óptica

$F_T$	fuerza a tracción
GPa	gigapascal
Gt	gigatonelada = 1000 megatoneladas (Mt) = 1000 millones de toneladas (t)
H, H <sub>2</sub> O	agua
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ácido sulfúrico
HDPE	polietileno de alta densidad
HDPE-L	polietileno de alta densidad de envases post-consumo de productos lácteos (leche)
$I_5$	índice de tenacidad correspondiente al área bajo la curva hasta una deformación igual a 3 veces de la que se produce en la primera fisura.
$I_{10}$	índice de tenacidad correspondiente al área bajo la curva hasta una deformación igual a 5,5 veces de la que se produce en la primera fisura.
$I_{20}$	índice de tenacidad correspondiente al área bajo la curva hasta una deformación igual a 10,5 veces de la que se produce en la primera fisura.
$I_{30}$	índice de tenacidad correspondiente al área bajo la curva hasta una deformación igual a 15,5 veces de la que se produce en la primera fisura.
K <sub>2</sub> O	óxido de potasio
kg	kilogramo
kN	kilo Newton
KOH	hidróxido de potasio

kV	kilovoltio
L	longitud
$L_{crit}$	longitud crítica
$L_{Fe}$	longitud de la fibra embebida en la matriz
$L_0$	longitud inicial
$L_f$	longitud final
l	litro
$\lambda$	esbeltez
LDPE	polietileno de baja densidad
$L_s$	distancia entre soportes en el ensayo a flexión
$\mu\text{g}$	microgramo
MgO	óxido de magnesio
ml	mililitro
$\mu\text{l}$	microlitro
$\mu\text{m}$	micra
MK	metacaolín
MPa	megapascal
$m_s$	masa aparente de la muestra en gramos
Mt	megatonelada = 1 millón de toneladas
$\text{MtCO}_2/\text{año}$	megatoneladas producidas de dióxido de carbono por año
N	Newton

Na <sub>2</sub> O	óxido de sodio
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfato de sodio
NaCl	cloruro de sodio
NaOH	hidróxido de sodio
PET	polietileno tereftalato
P-C	PET de envases post-consumo de bebidas carbonatadas
P-NC	PET de envases post-consumo de bebidas no carbonatadas
PM	peso molecular
PMMA	polimetilmetacrilato
P-MF	PET de envases post-consumo reprocesado en forma de multifilamento
PV-MF	PET virgen elaborado en forma de multifilamento
PT-MF	PET virgen termoconformado elaborado en forma de multifilamento
PP	polipropileno
PP-E	Polipropileno elaborado en fibras para la producción de escobas
PS	poliestireno
PVC	policloruro de vinilo
RHA	ceniza de cáscara de arroz (rice husk ash)
$\rho_s$	densidad aparente del material
$\rho_{IL}$	densidad del líquido de inmersión empleado en la determinación de la densidad aparente del material

RMG	residuos municipales generados
RSM	residuos sólidos municipales
RSU	residuos sólidos urbanos
RUR	residuos urbanos recogidos
$\sigma$	tensión
$\sigma_{Cm\acute{a}x}$	tensión máxima a compresión
$\sigma_{Fm\acute{a}x}$	resistencia máxima a flexión
$\sigma_T, \sigma_t$	tensión a tracción
$\sigma_{Tf}$	tensión a tracción en fibras
$\sigma_{Tm\acute{a}x}, \sigma_{tm\acute{a}x}$	tensión máxima a tracción del material ensayado
$\sigma_{LE}$	límite elástico, tensión en el límite de proporcionalidad en materiales elásticos con tramo proporcional
$\sigma_{pr}$	tensión en el límite de proporcionalidad en materiales con tramo proporcional
S	segundo
S	sílice
SA	sílico-alúmina
SCH	silicato cálcico hidratado
SACH	silicoaluminato cálcico hidratado
$S_f$	sección de la fibra
SF	humo de sílice

---

$\text{SiO}_2$	óxido de silicio
$\text{SO}_3$	trióxido de azufre
SSA	ceniza de lodos de depuradora (sewage sludge ash)
t	espesor de la sección
T	tenacidad, 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
$\tau_F$	tensión de cortante en la interfaz matriz-fibra
$\tau_{F\text{máx}}$	tensión máxima de cortante en la interfaz matriz-fibra
w	ancho de la sección