

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 pero 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'1x18mm², amb tall de cisalla, i de 4x18 mm², de 4 x 35 mm² i de 4 x 50 mm² 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

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 ²	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 ³	158
Figura 3.60	Resistencia a flexión probetas 40 x 40 x 160 mm ³	158
Figura 3.61	Ensayo a flexión muestras 22,5 x 5 x 1 cm ³	159
Figura 3.62	Ensayo a flexión muestras 24 x 24 x 1 cm ³	161
Figura 3.63	Ensayo a compresión en muestras con secciones de 25 x 40 mm ²	162
Figura 3.64	Ensayo a compresión en muestras con secciones de 40 x 40 mm ²	162
Figura 3.65	Ejemplo de aplicación del ajuste por mínimos cuadrados.....	163
Figura 3.66	Gráfica esquemática tensión/deformación para compresión.....	164
Figura 3.67	Diagrama carga-flecha esquemático con indicación de los límites para el cálculo de tenacidad (T) e índice 30 (I ₃₀)	165
Figura 3.68	Diagrama carga-flecha esquemático con indicación de los límites para el cálculo de los índice 5, 10 y 20 (I ₅ , I ₁₀ e I ₂₀).....	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 (σ_{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 (σ_t) / deformación (ϵ) en fibra óptica (FO) según marca. 184

Figura 4.13 Resistencia a tracción (σ_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 (σ_t) / deformación (ϵ) 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 (σ_{LE}) / límite de proporcionalidad (σ_{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 (σ_{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 ³	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 ³	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 ³	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 ³	284
Figura 4.116	Tenacidad (T) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm ³	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 ³ , 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 ³ , 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 ²	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 ²	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 ² y 4 x 18 mm ²	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 ²	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 ²	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 ₂ en el uso de Combustibles Fósiles con emisiones de más de 0,1 Mt de CO ₂ 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 (σ_{LE})/límite de proporcionalidad (σ_{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 ²	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

