

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 plàstics 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

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 recidado 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 mm2.....	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 Pórtland.....	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 (σ_{tmax})..... 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 ($\sigma_{t\max}$) 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	Energía en período elástico (E_{PE}) 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 dorrhídrico 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-C 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 ($\sigma_{m\acute{a}x}$). 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 ($\sigma_{\text{máx}}$) 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 ($\sigma_{t\ max}$), 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

