

# 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)

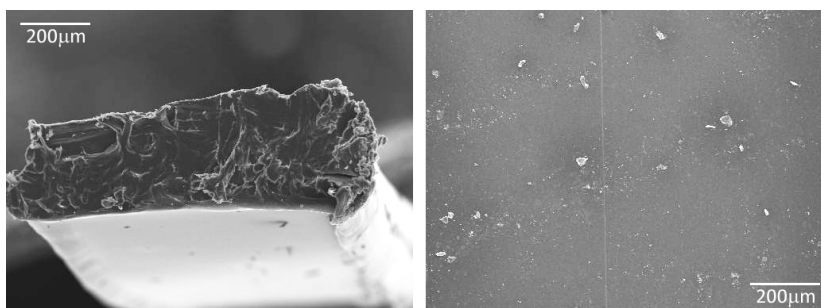
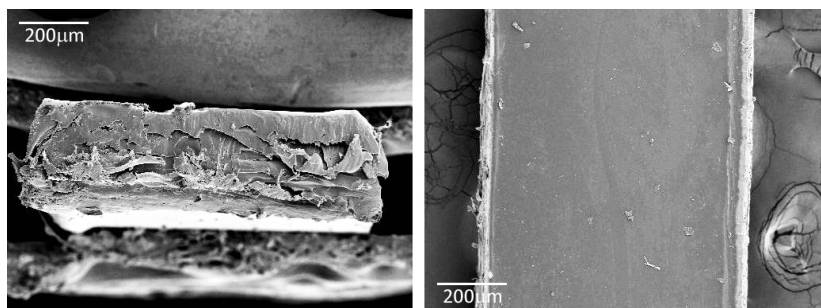
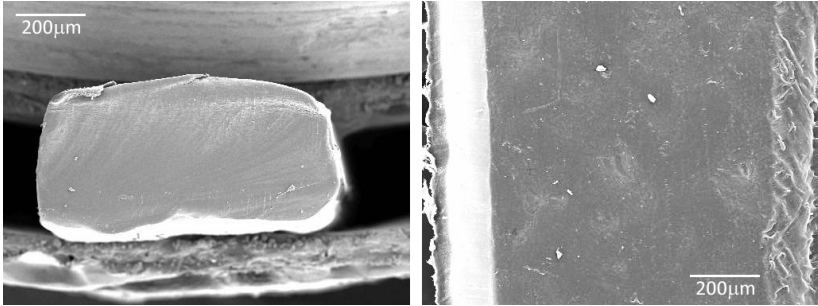


Figura 4.2 - Fibras de envases post-consumo de PET, bebida carbonatada (P-C).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



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)

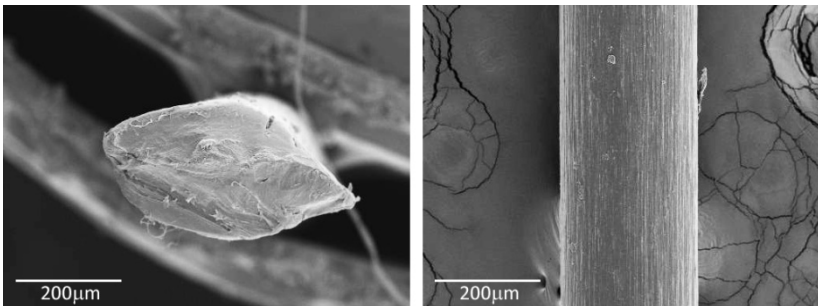


Figura 4.5 - Fibras de PET virgen, multifilamentos (PV-MF).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)

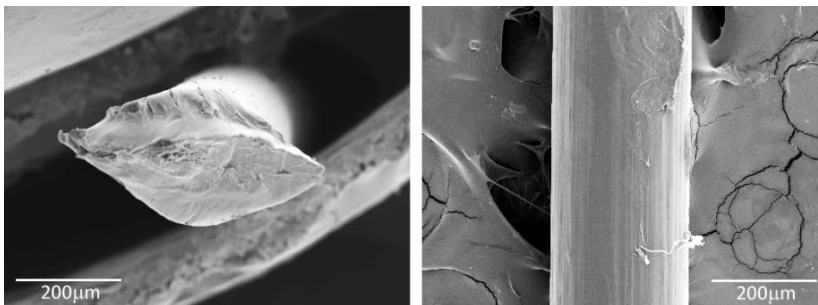
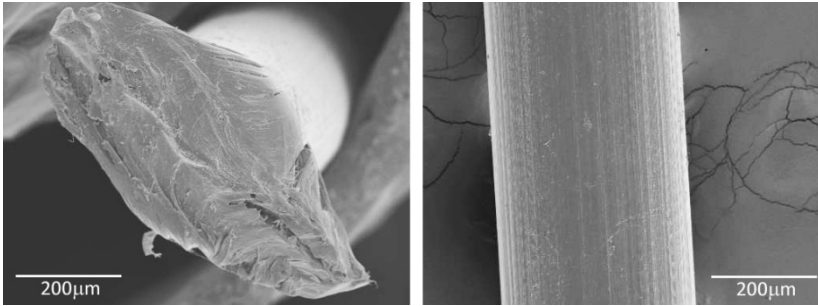


Figura 4.6 - Fibras de PET virgen termoconformado, multifilamentos (PT-MF).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)

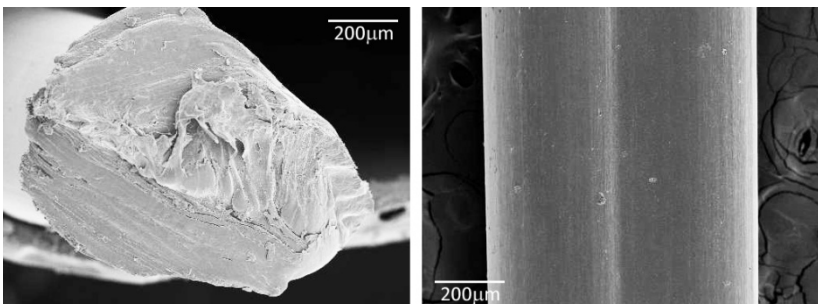


Esta textura se muestra estriada revelando los monofilamentos que las componen, los cuales, producto del corte, se separan en los extremos desdibujando su sección transversal originariamente circular.

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.

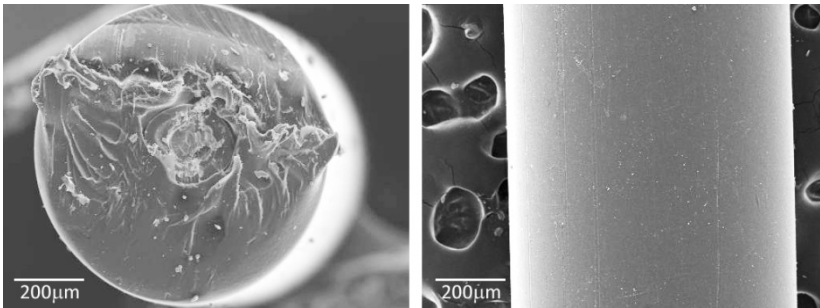
Sin embargo, las fibras elaboradas con los monofilamentos de polipropileno, también para escobas, PP-E (Figura 4.7), presentan una sección transversal maciza y una textura superficial longitudinal sin resaltos, a excepción de una hendidura central de poca profundidad.

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).

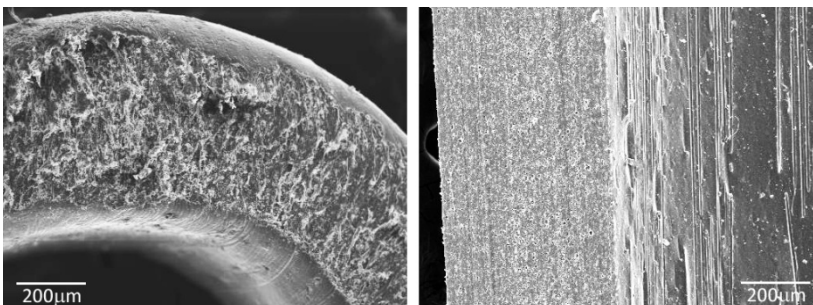
Figura 4.8 - Fibra óptica (FO).  
Sección transversal (izquierda), sección longitudinal (derecha)



En su sección transversal se distingue claramente las zonas del núcleo silíceo 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 ( $\sigma_{t\text{máx}}$ )

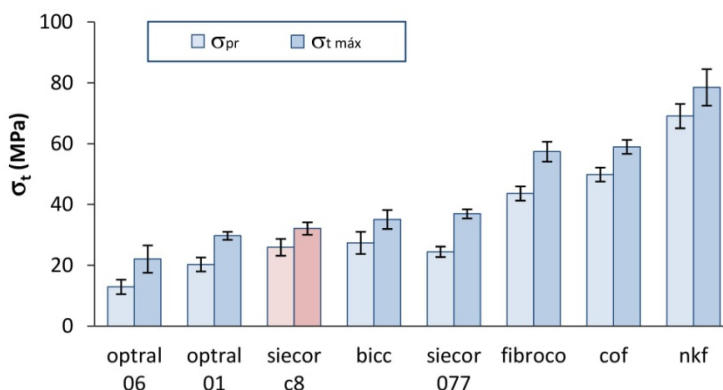
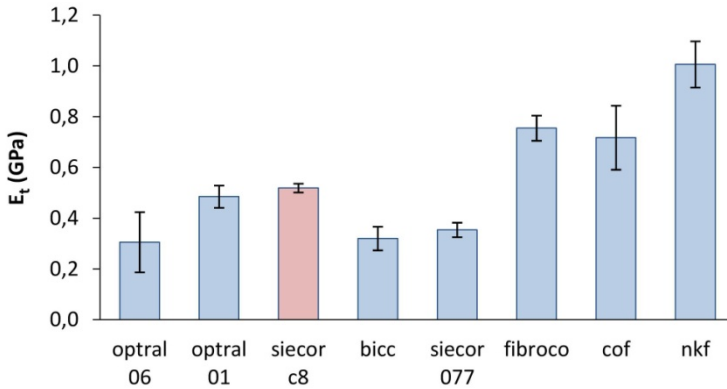
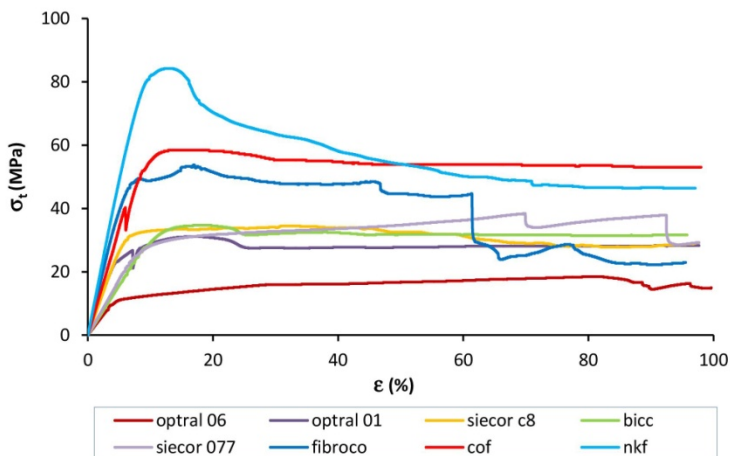


Figura 4.11 - Módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de distintos tipos de fibra óptica (FO)



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 sílice 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.

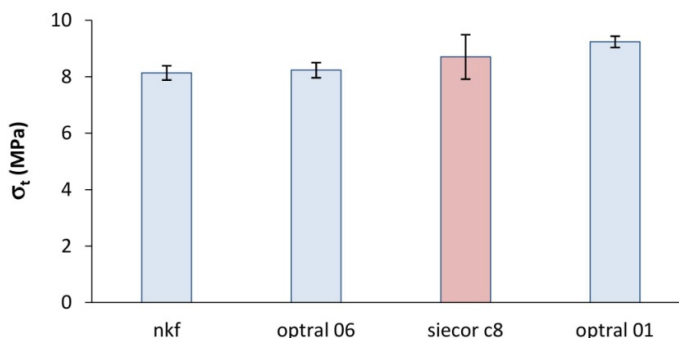


Figura 4.14 - Módulo elástico a tracción ( $E_t$ ) de distintos tipos de fundas de protección de fibra óptica (FP-FO)

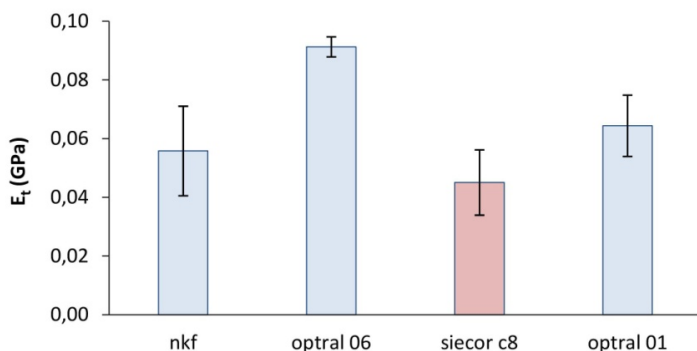
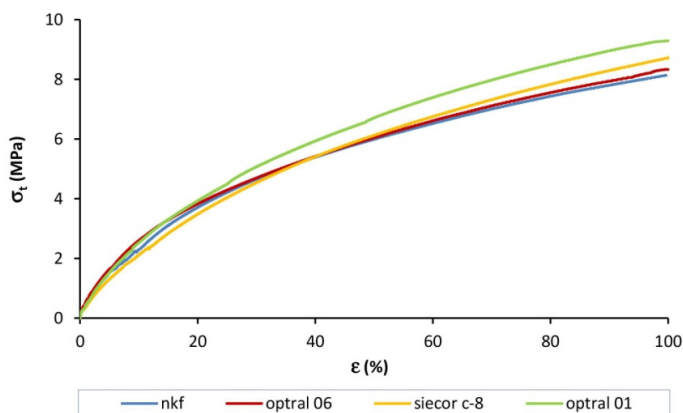


Figura 4.15 - Relación tensión a tracción ( $\sigma_t$ ) / deformación ( $\epsilon$ ) en funda de protección de fibra óptica (FP-FO) según marca.



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.

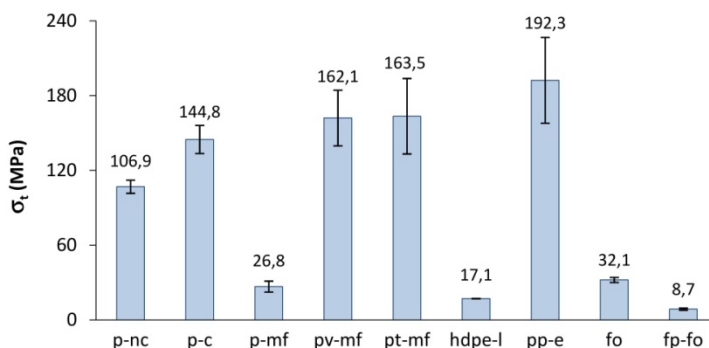


Figura 4.17 - Límite elástico ( $\sigma_{LE}$ ) / límite de proporcionalidad ( $\sigma_{pr}$ ) de las fibras analizadas.

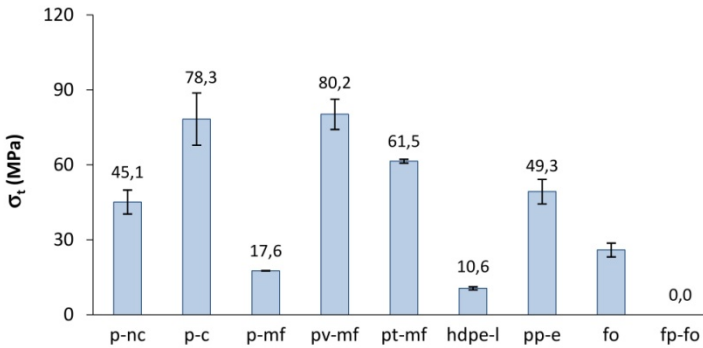
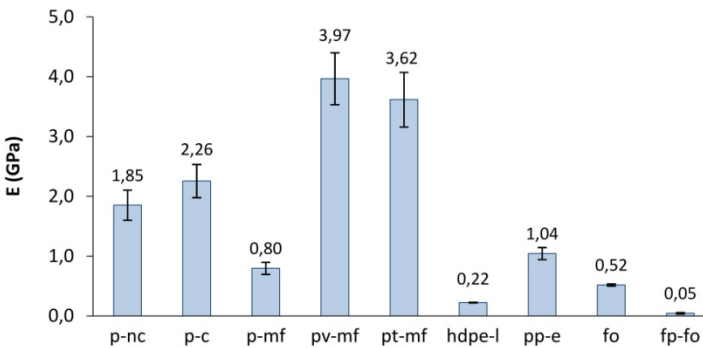


Figura 4.18 - Módulo de elasticidad (E) de las fibras analizadas



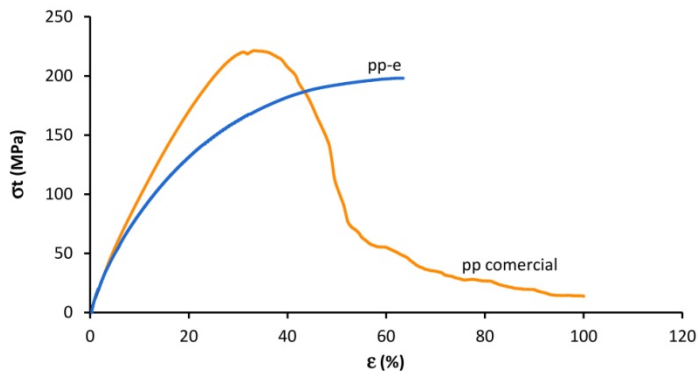
De los nueve tipos de fibras analizadas, las que presentan mayor resistencia a tracción son las PP-E, producidas por la empresa Sp-Berner con material virgen.

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)



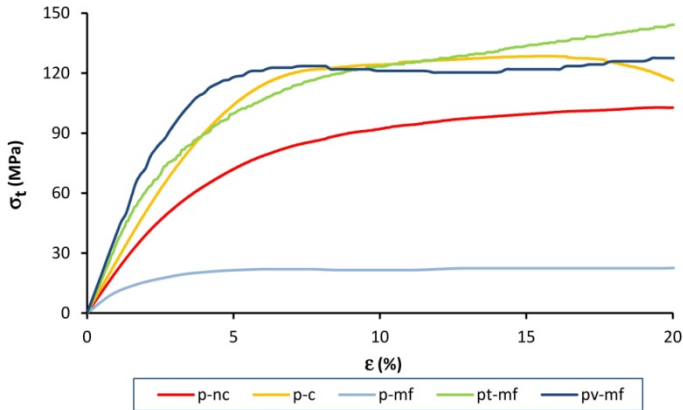
Dentro de las fibras de PET, las producidas con material virgen para la elaboración de escobas (PV-MF y PT-MF) presentan las mayores resistencias, así como los mayores módulos elásticos, seguidas por las producidas por corte de envases post-consumo (P-NC y P-C), si bien las deformaciones máximas alcanzadas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



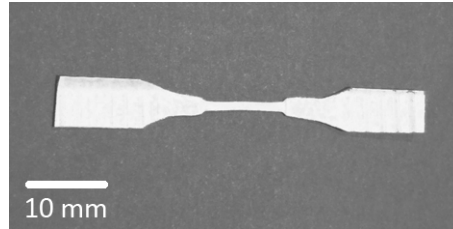
No obstante, las fibras multifilamentos elaboradas con PET reprocesado (P-MF) presentan una resistencia menor al 20% de las obtenidas en las otras fibras producidas con PET. Esta variación podría estar justificada por ser elaboradas con materiales que han sido expuestos a este procedimiento de reprocesado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

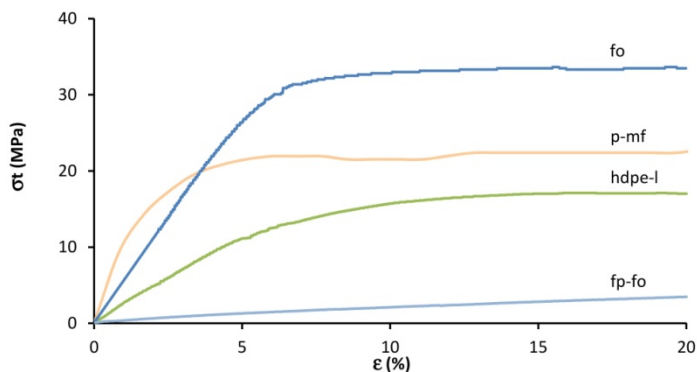
En todas ellas, una vez alcanzada la tensión del límite de proporcionalidad ( $\sigma_{LE}$  ó  $\sigma_{pr}$ ), presentan un estrangulamiento en la sección que se mantienen durante todo el intervalo plástico o no proporcional. El caso más notorio lo constituye la fibra de HDPE-L (Figura 4.21) donde 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

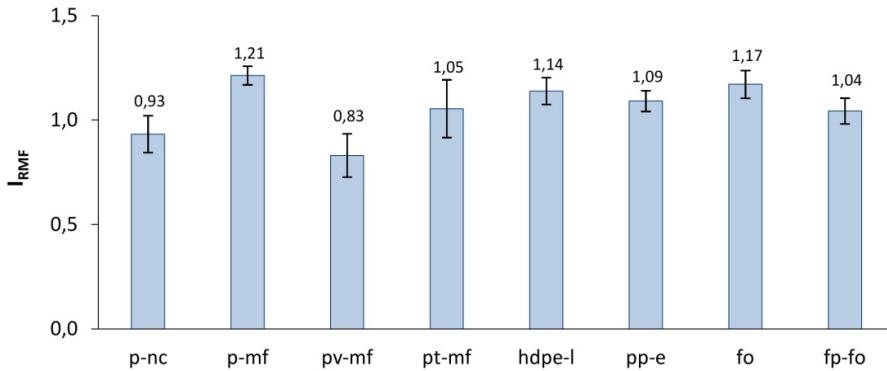
Para este ensayo, como se mencionó en el Capítulo 3, punto 3.3.7.1, las muestras se corresponden con cada una de las mitades que surgen del corte transversal de la



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.

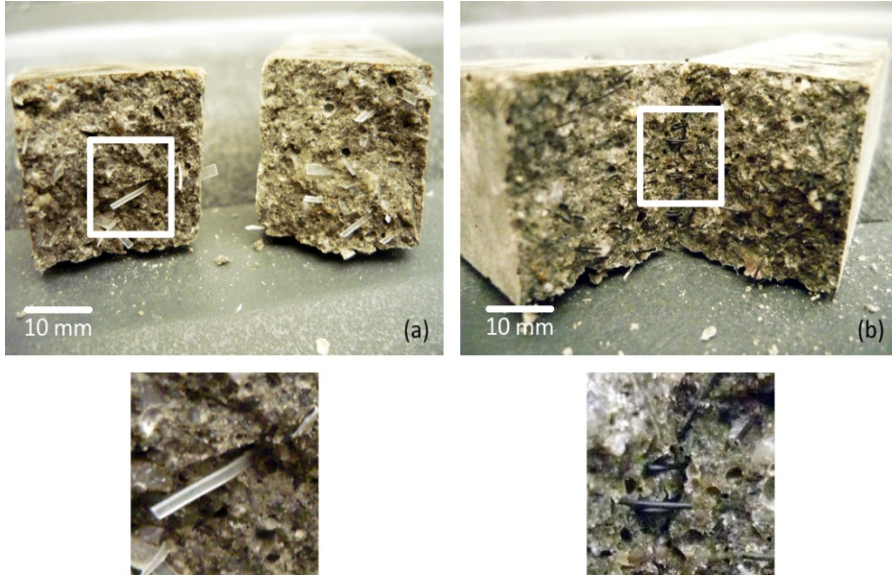
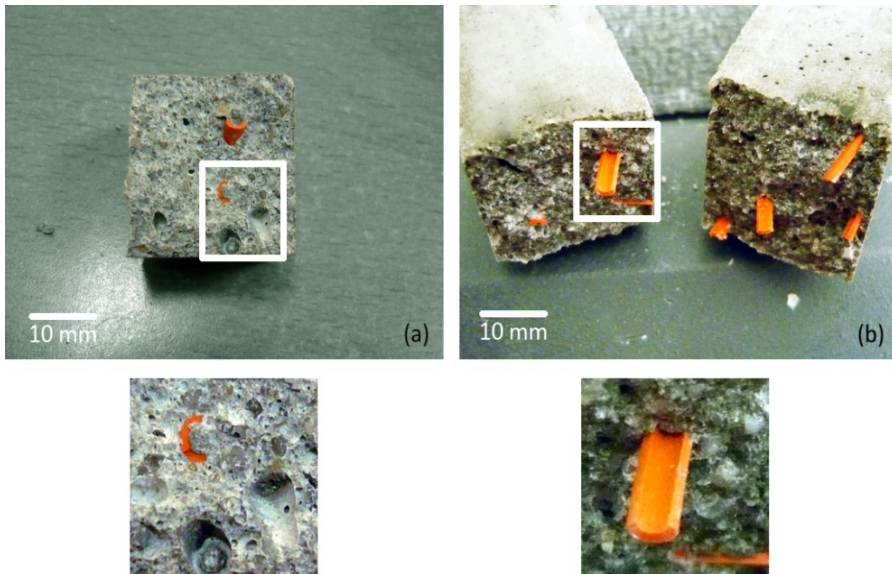


Figura 4.25 - Secciones de rotura a flexión de muestras fibro-reforzadas con FP-FO. (a) sección original (b) sección cortada en 4 partes.



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.

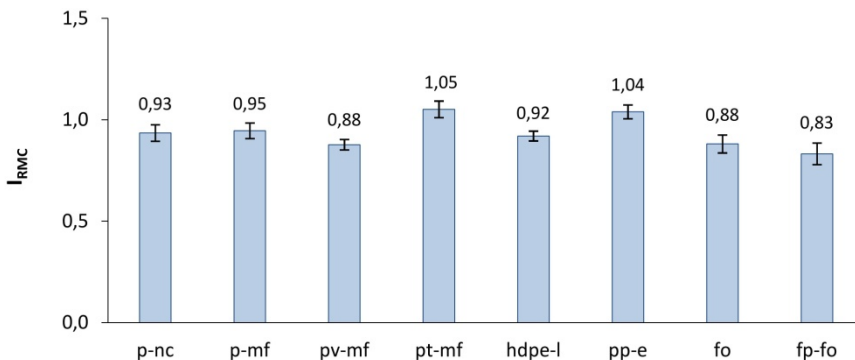
#### 4.1.3.2 Compresión

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.

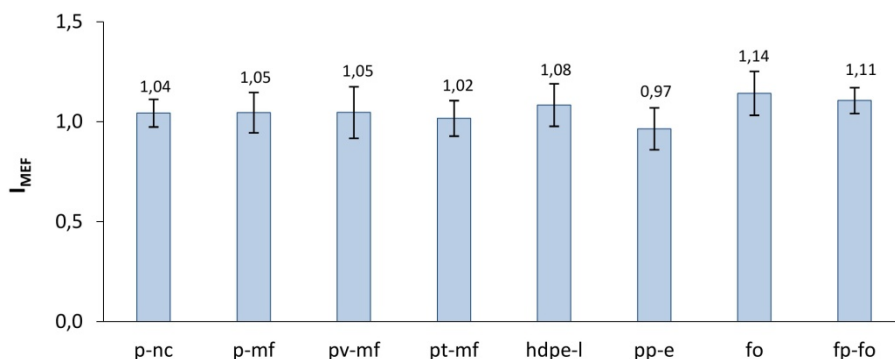
Por este motivo, los valores aquí obtenidos no se pueden comparar con el valor de módulo de Young (E) que figure en documentos bibliográficos, si se desea realizar su comparación debe hacerse con los módulos elásticos correspondientes a iguales sollicitaciones.

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

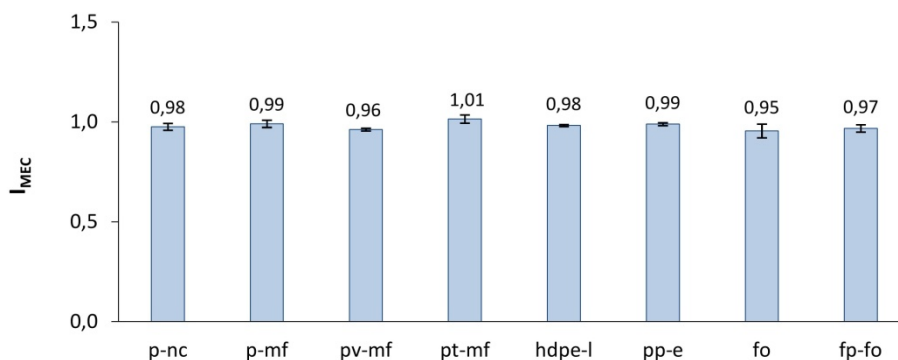
a través de la zona interfacial, permitiendo resistir algo más de tensiones ante iguales valores de deformación.

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.

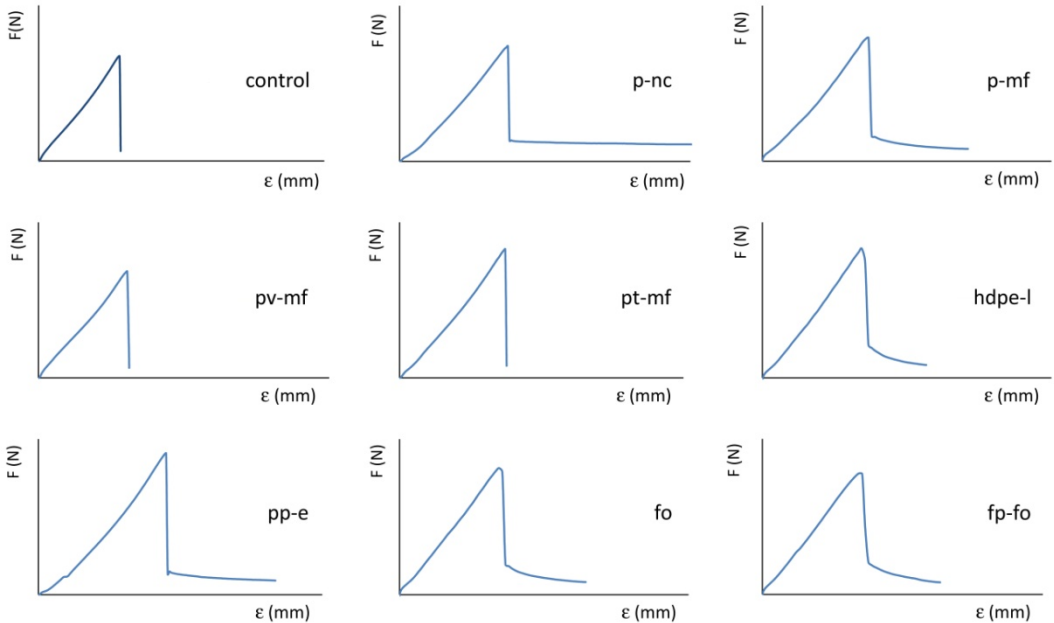
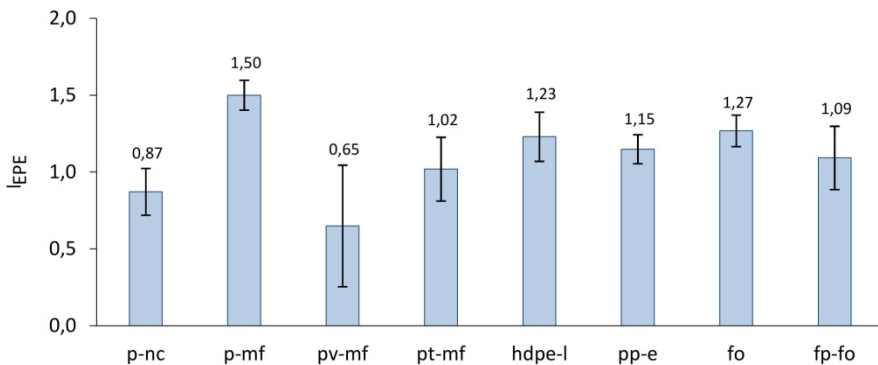


Figura 4.30 – Índice de energía en período elástico ( $I_{EPE}$ ) de mortero de cemento fibro-reforzado con fibras provenientes de materiales de residuo y de la empresa SP-Berner.



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) entendiendo 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 microscopia 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

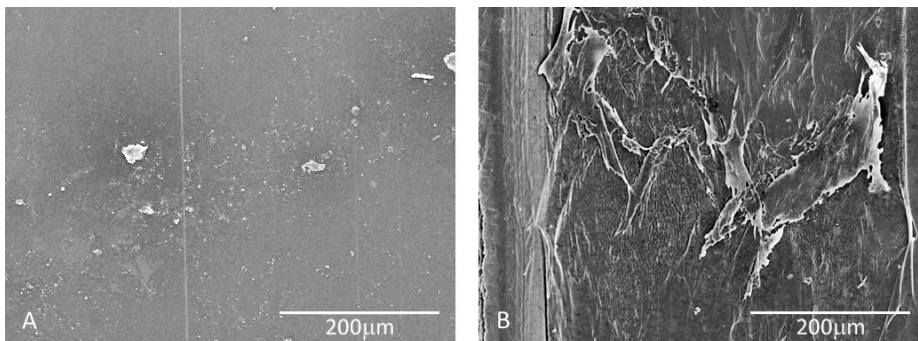


Figura 4.32 – Fibra de P-C tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

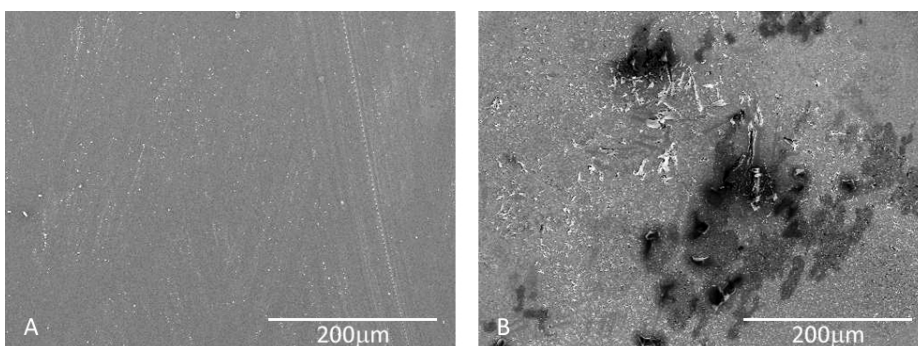


Figura 4.33 – Fibra de P-MF tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

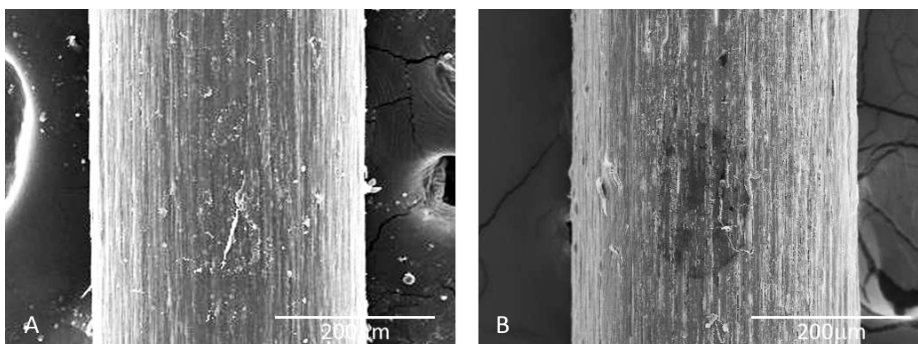


Figura 4.34 – Fibra de HDPE-L tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

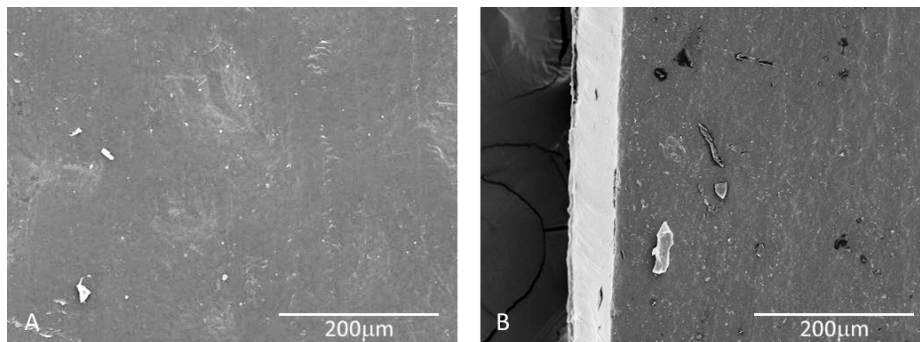


Figura 4.35 – Fibra de FO tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina

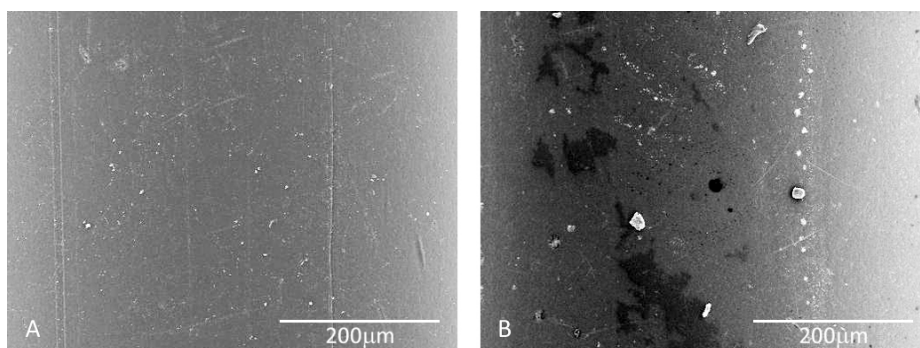
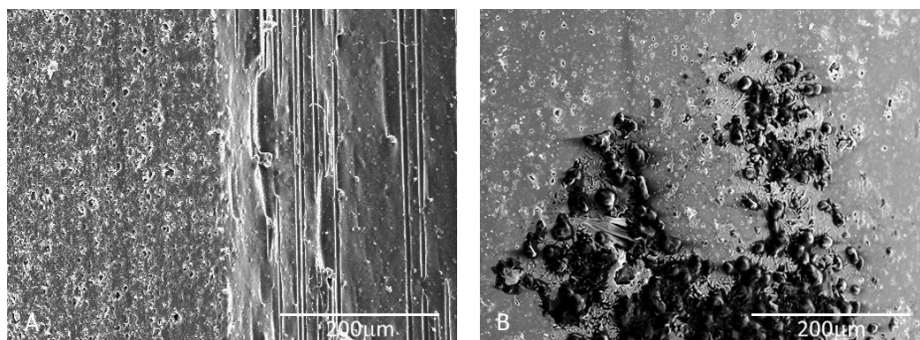


Figura 4.36 – Fibra de FP-FO tratada con solución alcalina a temperatura ambiente.  
A – control ; B – 15 días en solución alcalina



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

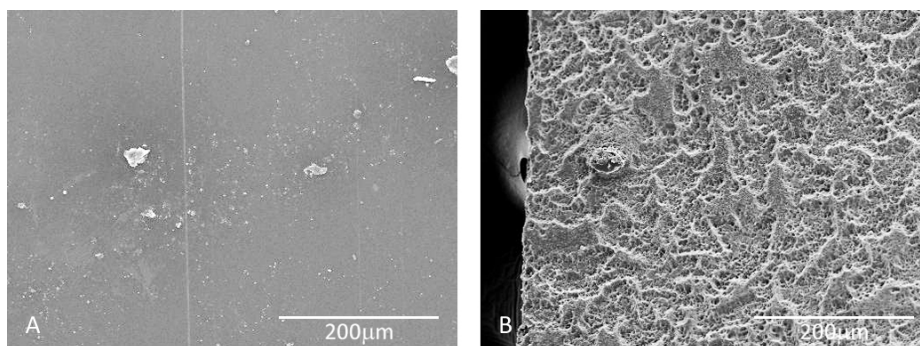


Figura 4.38 – Fibra de P-C en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

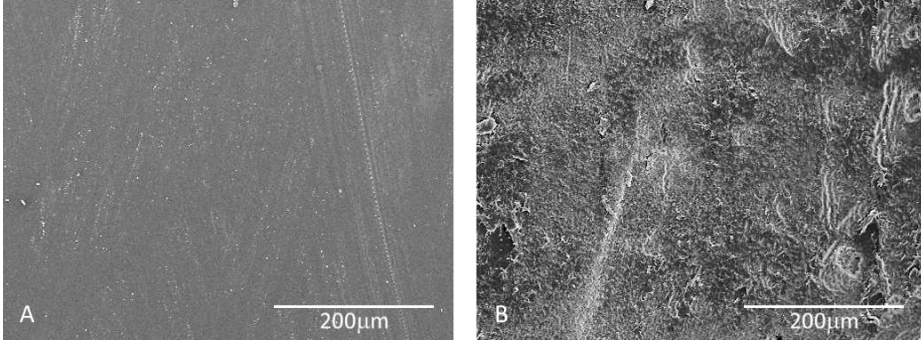


Figura 4.39 – Fibra de P-MF en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

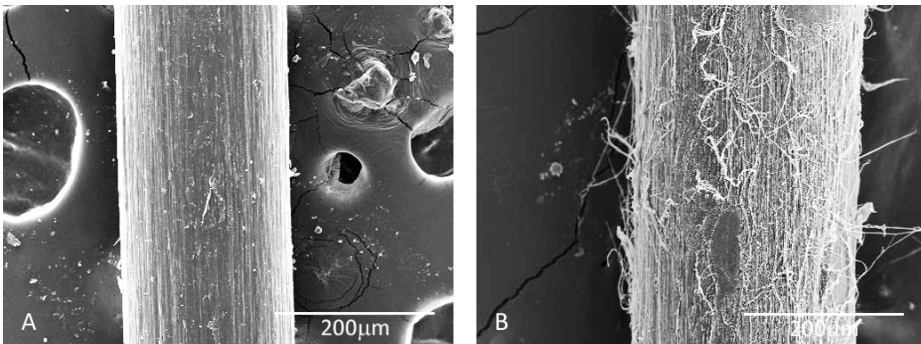


Figura 4.40 – Fibra de HDPE-L en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

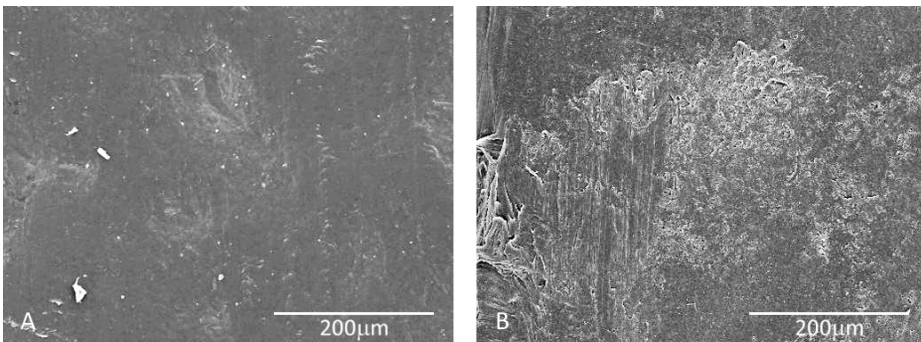


Figura 4.41 –Fibra de FO en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

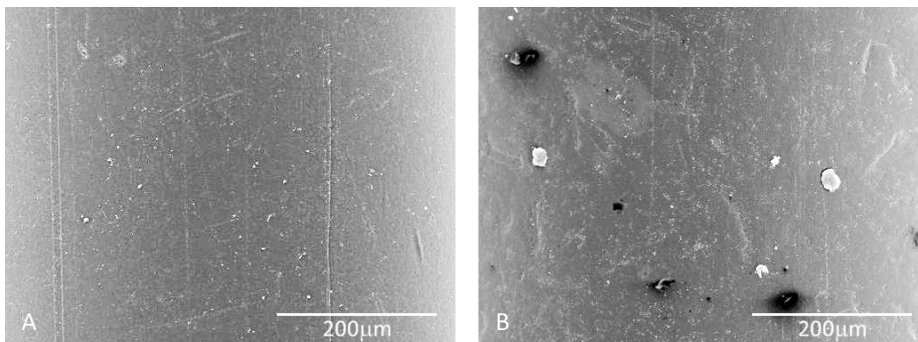
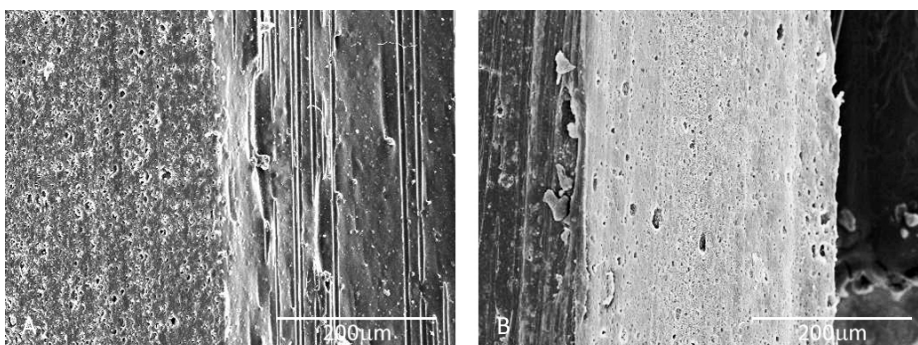


Figura 4.42 – Fibra de FP-FO en pasta cementicia y curado en baño a 60 °C.  
A – control ; B – en pasta cementicia

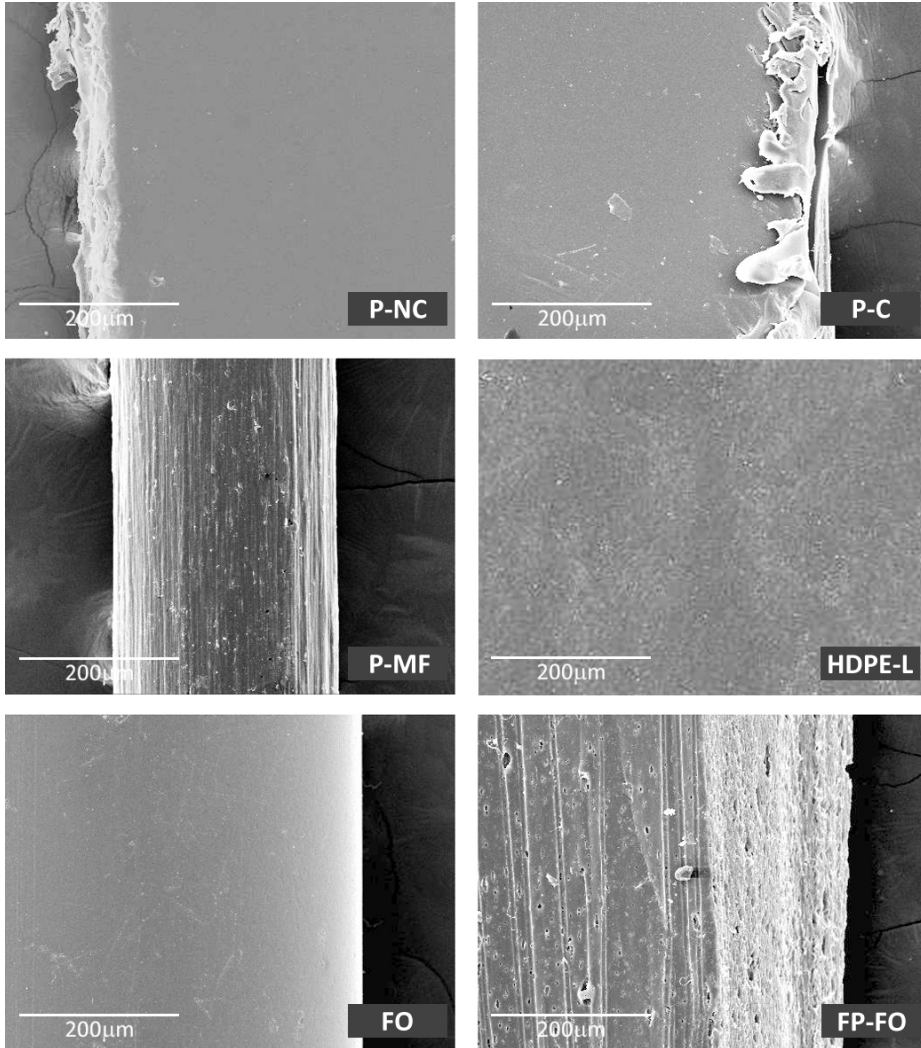


De los seis tipos de fibra, las que se observan más degradadas son las de PET y las HDPE, siendo el orden de mayor a menor degradación: P-NC > P-MF > P-C > HDPE-L. En las fibras provenientes del residuo del cableado de Fibra Óptica, la FP-FO muestra pequeños signos de degradación, en forma de poros,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

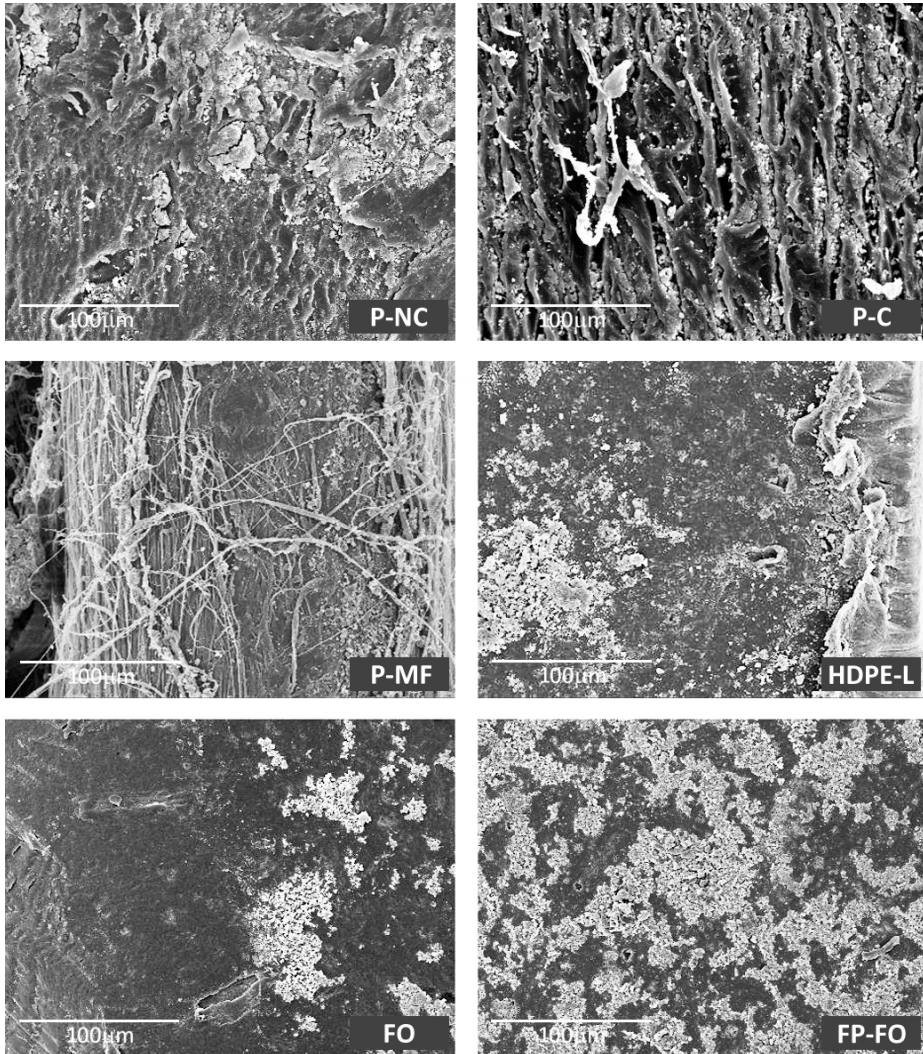


Figura 4.43 - Fibras vírgenes lavadas con disolución de ácido clorhídrico diluido.



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).

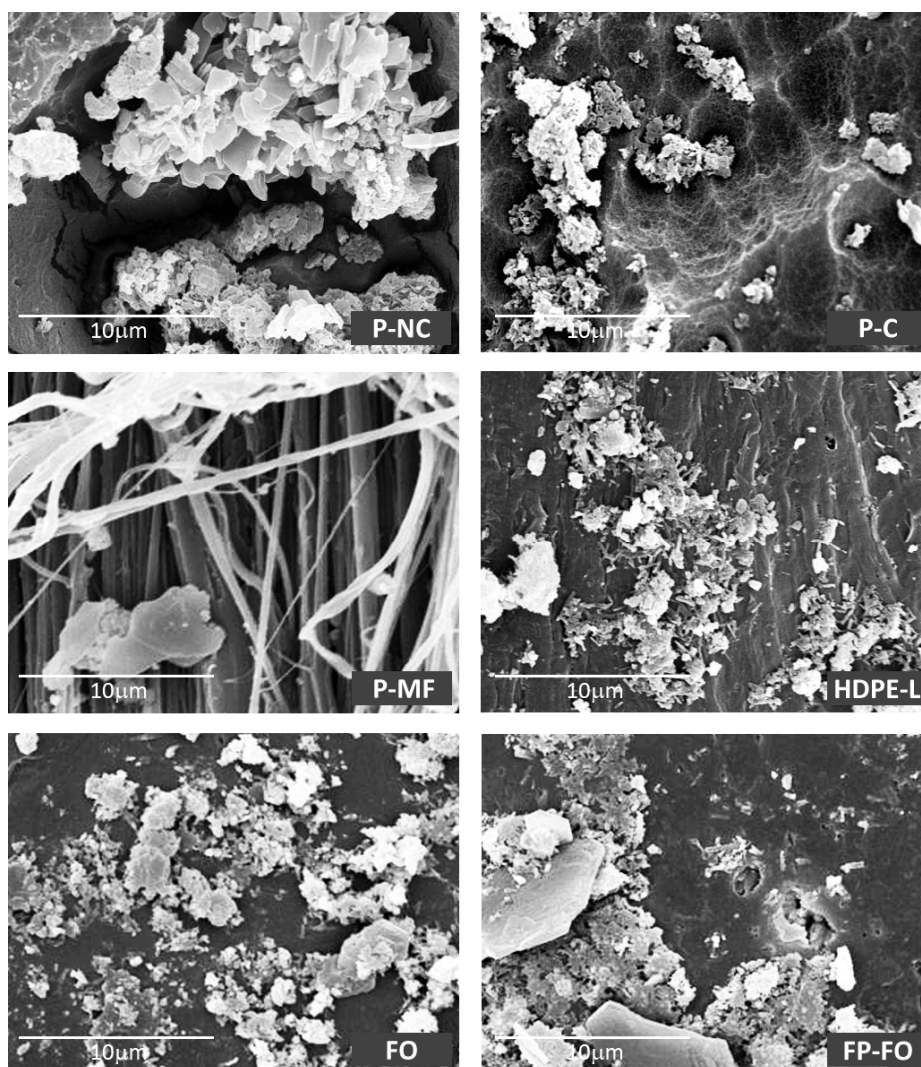
Figura 4.44 - Fibras en pasta cementicia con curado en baño 60 °C, sin lavar.



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.

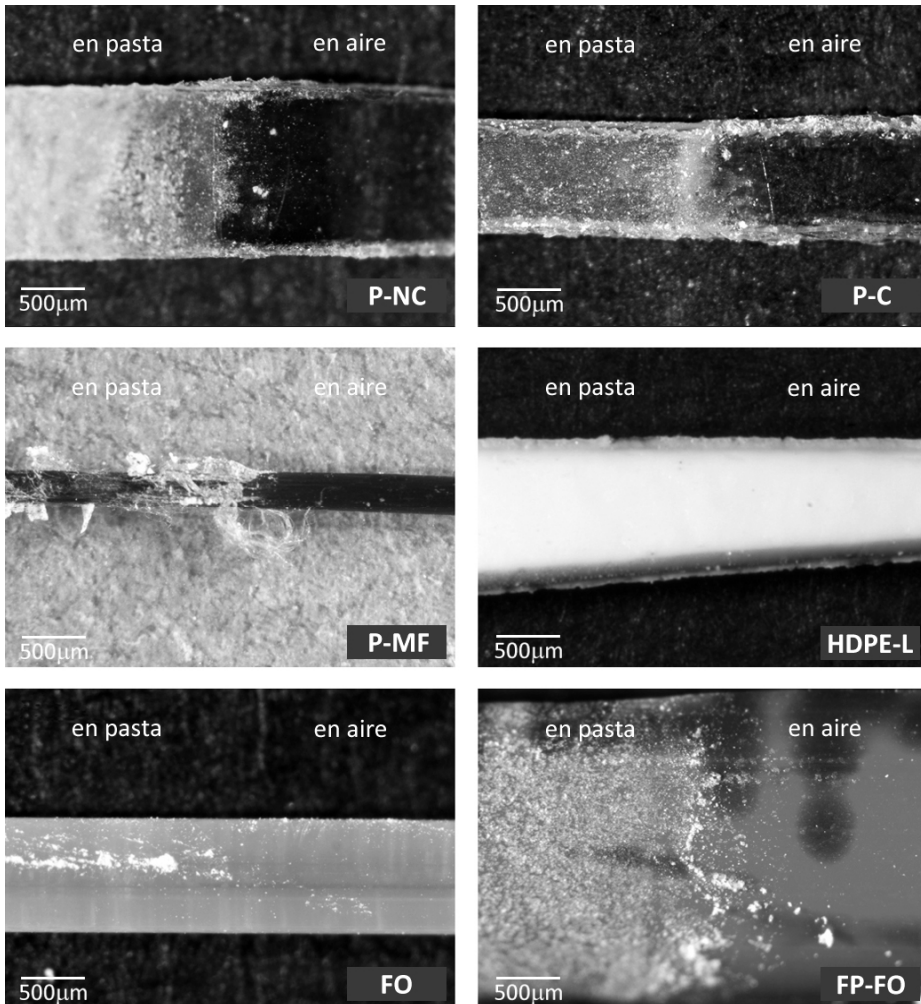
La cantidad de pasta adherida a cada fibra confirma las conclusiones de agresión superficial. La mayor degradación en la superficie de las fibras, coincide con una mayor presencia de pasta en las oquedades, coincidiendo el orden de cantidad de productos de hidratación de cemento, en orden decreciente, 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.

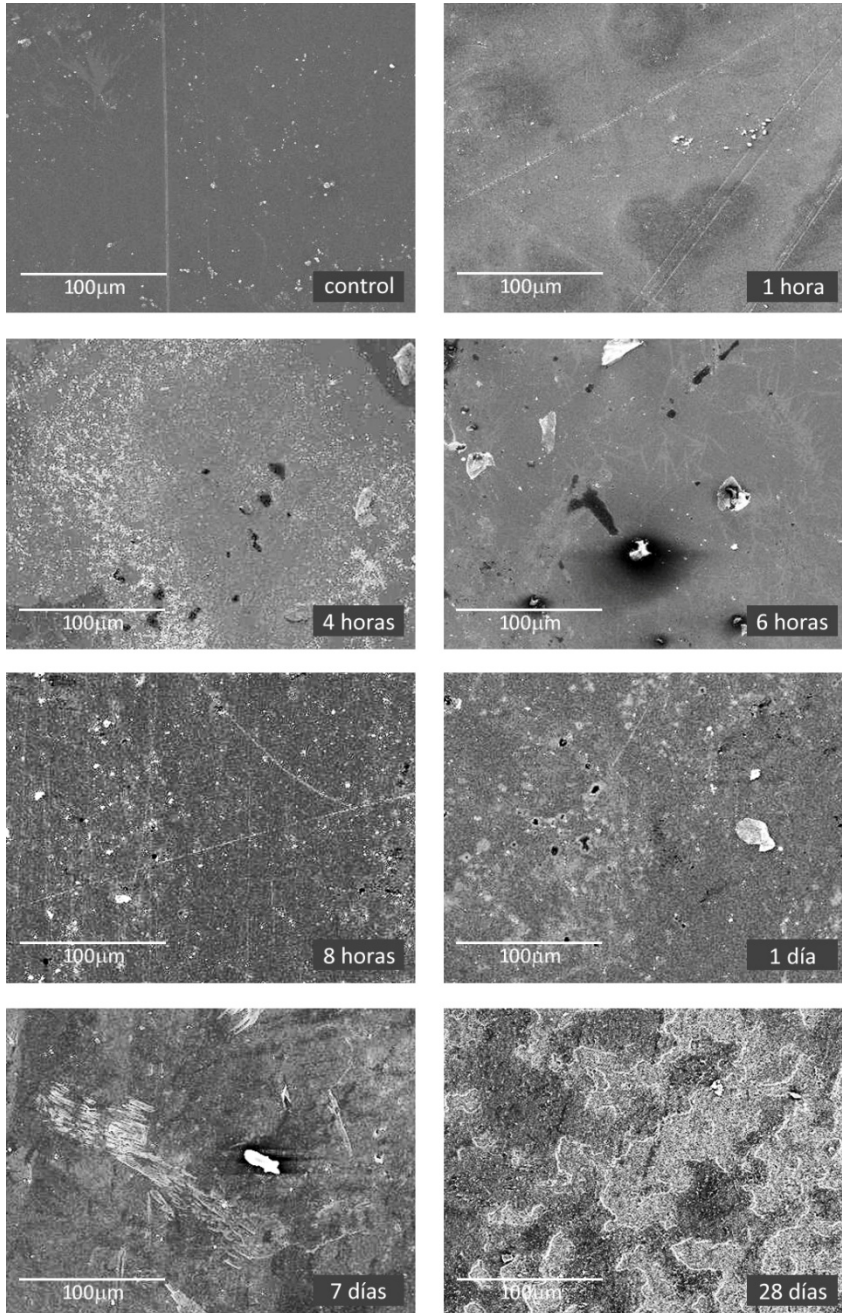


Figura 4.48 - Fibras P-C: evolución de la degradación hasta 28 días.

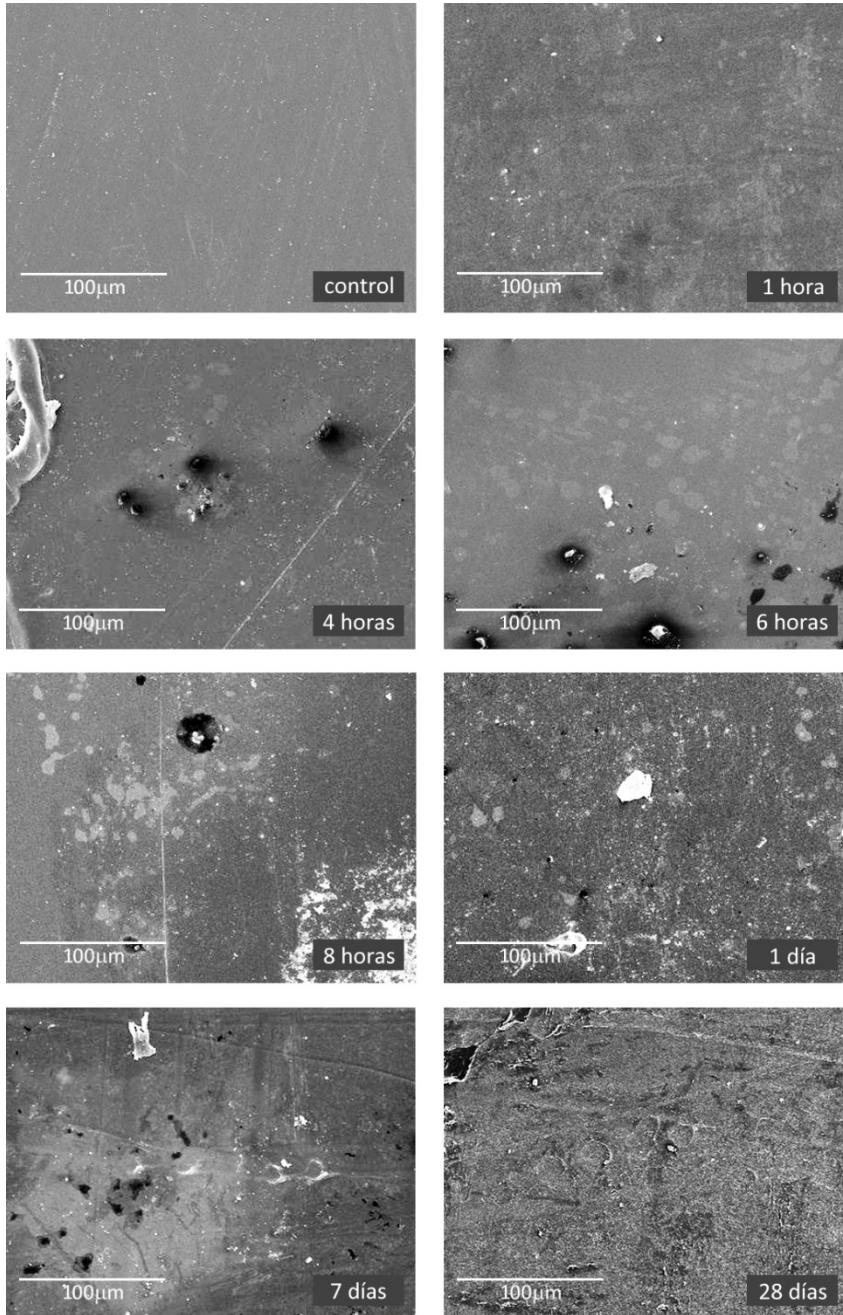




Figura 4.49 - Fibras P-MF: evolución de la degradación hasta 28 días.

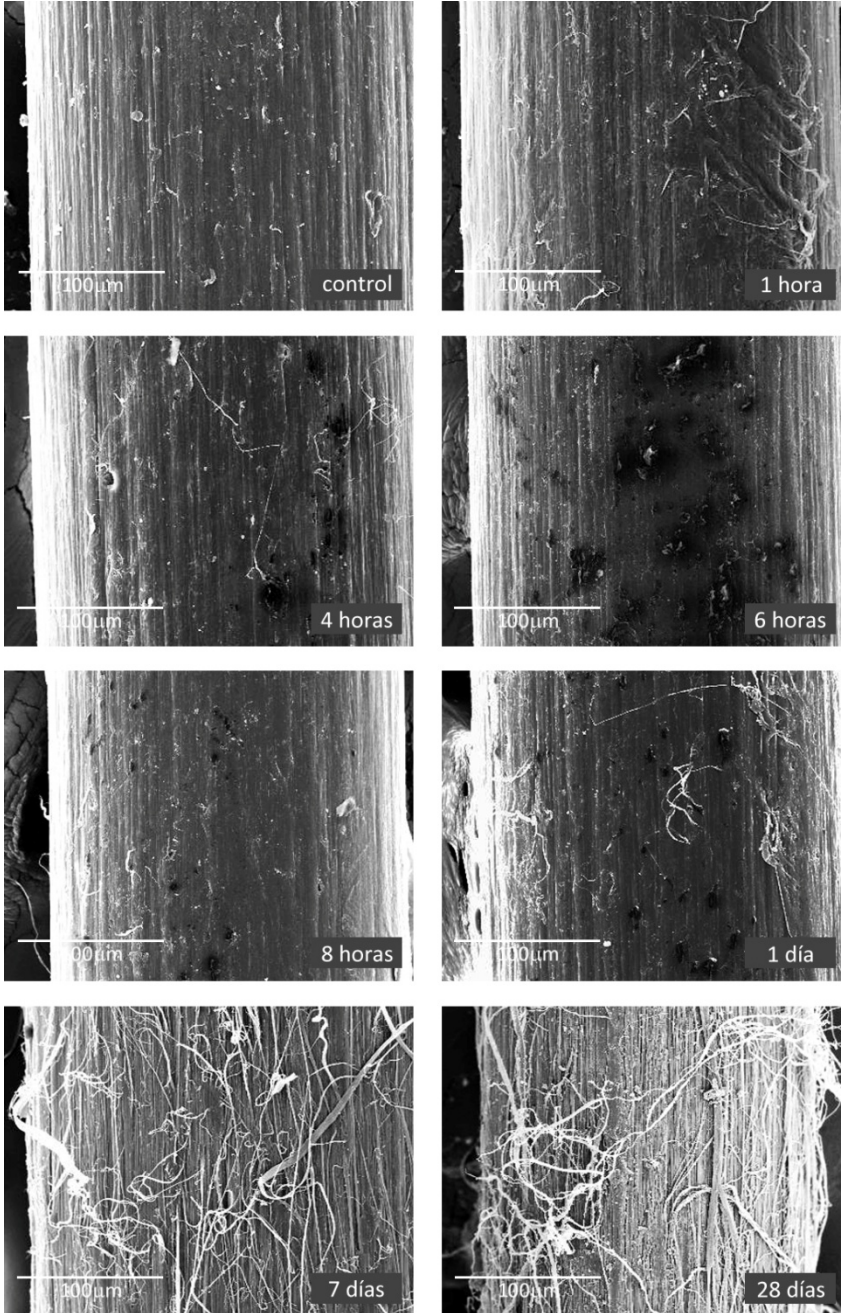


Figura 4.50 - Fibras HDPE-L: evolución de la degradación hasta 28 días.

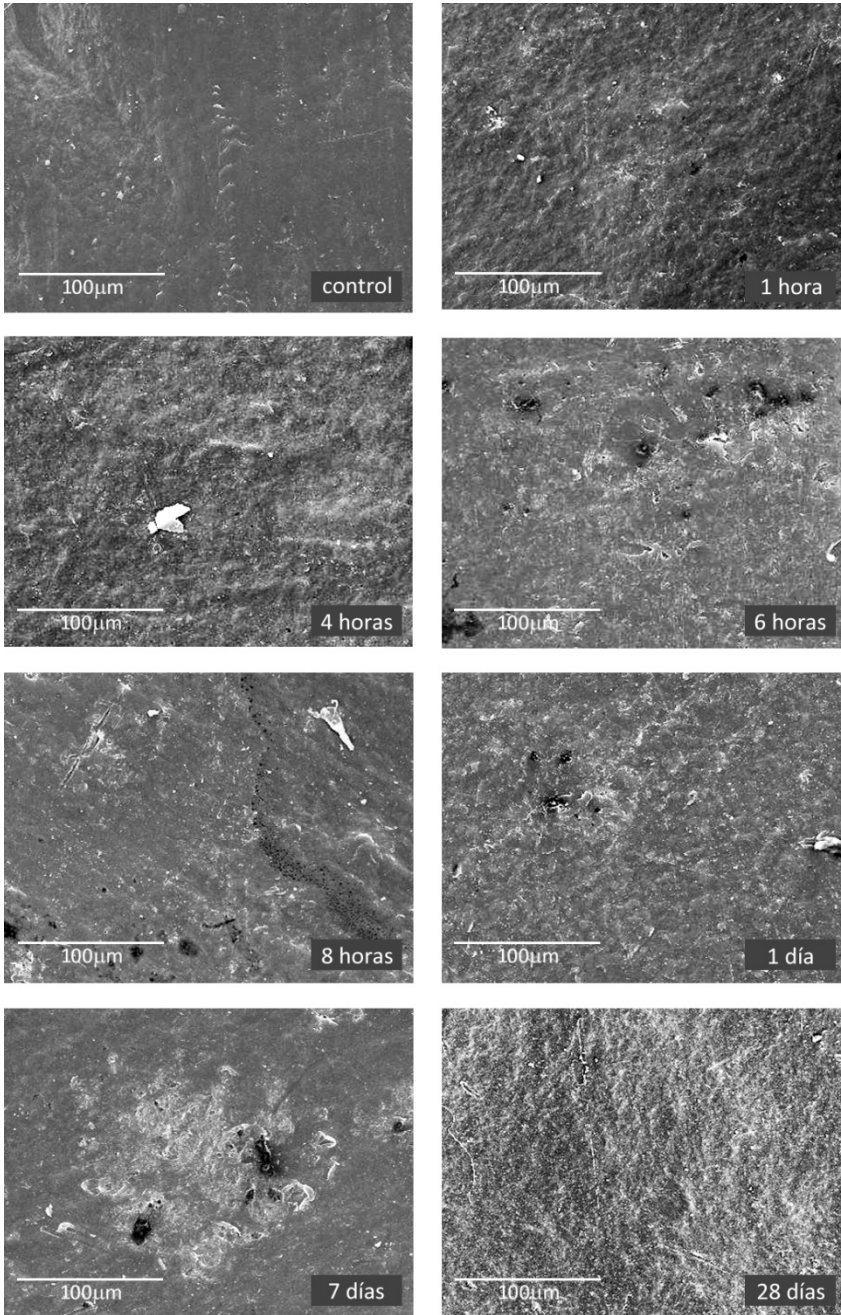
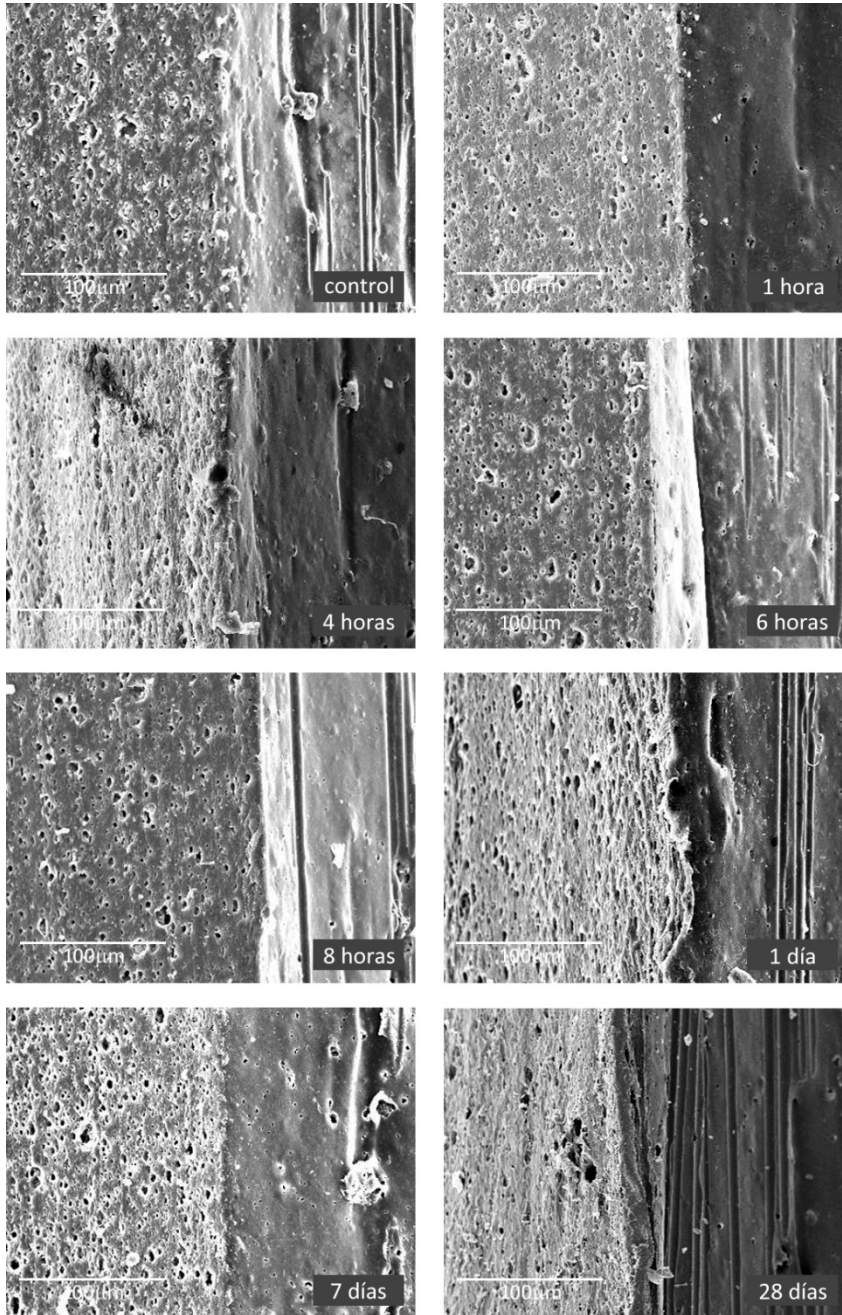


Figura 4.51 - Fibras FP-FO: evolución de la degradación hasta 28 días.



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.

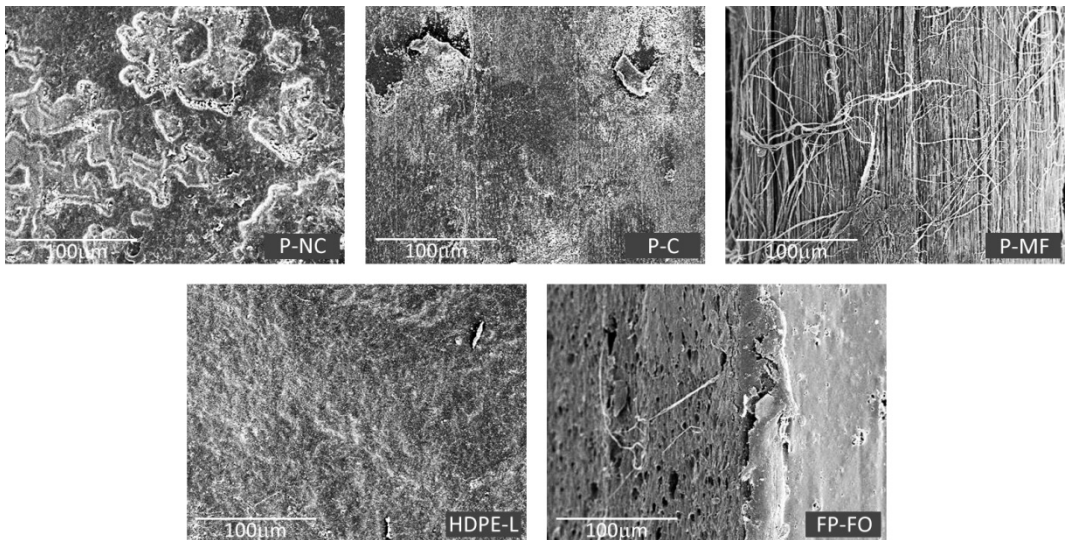
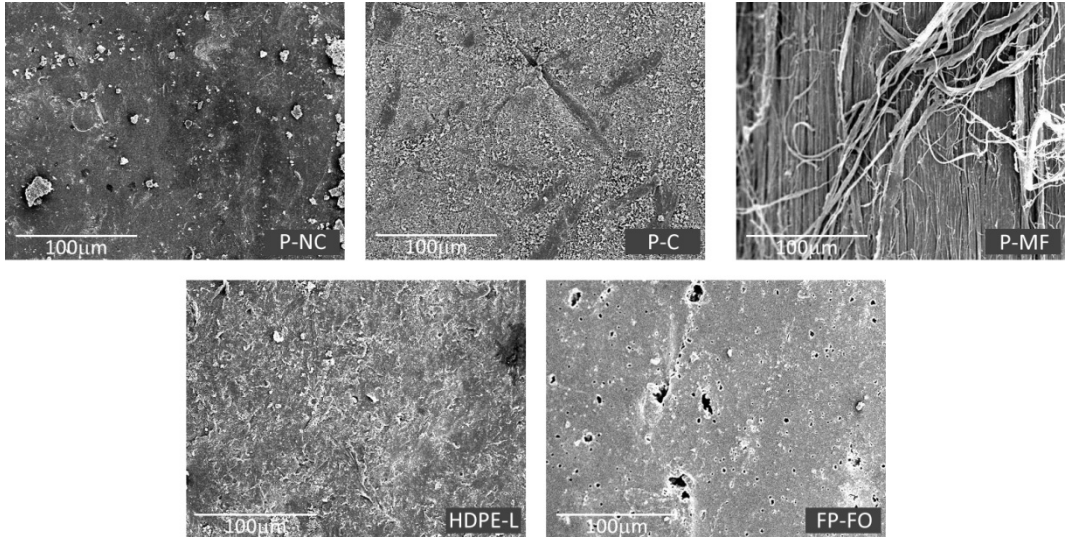


Figura 4.53 - Fibras en mortero de matriz de cemento Pórtland. Edad: 190 días.



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

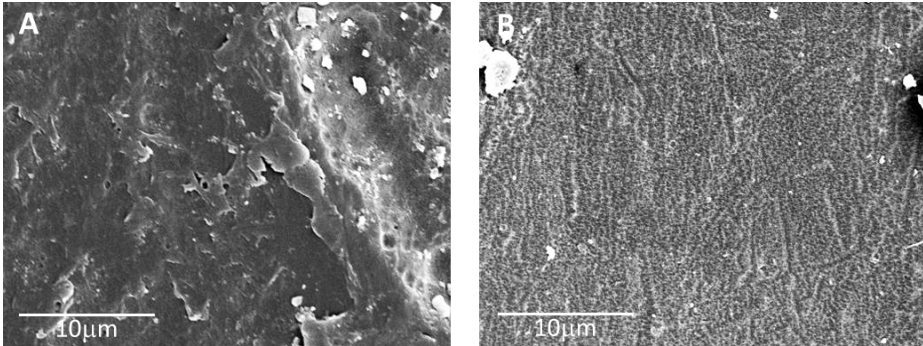
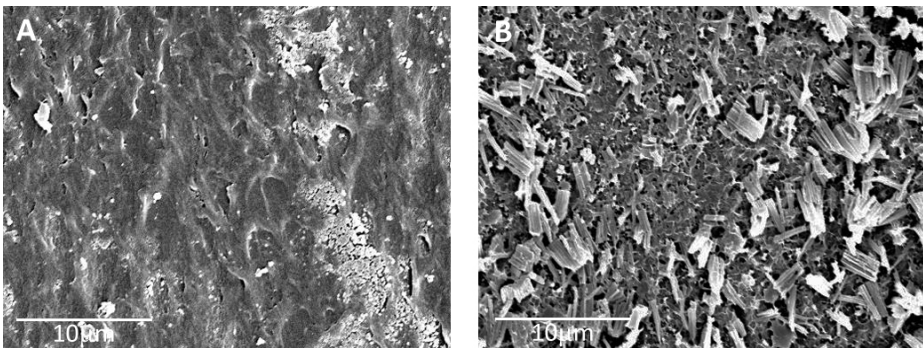


Figura 4.55 - Fibras P-C: comparación degradación en pasta y mortero de cemento.  
A – en pasta cementicia 140 días ; B – en mortero de cemento 190 días



#### 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.

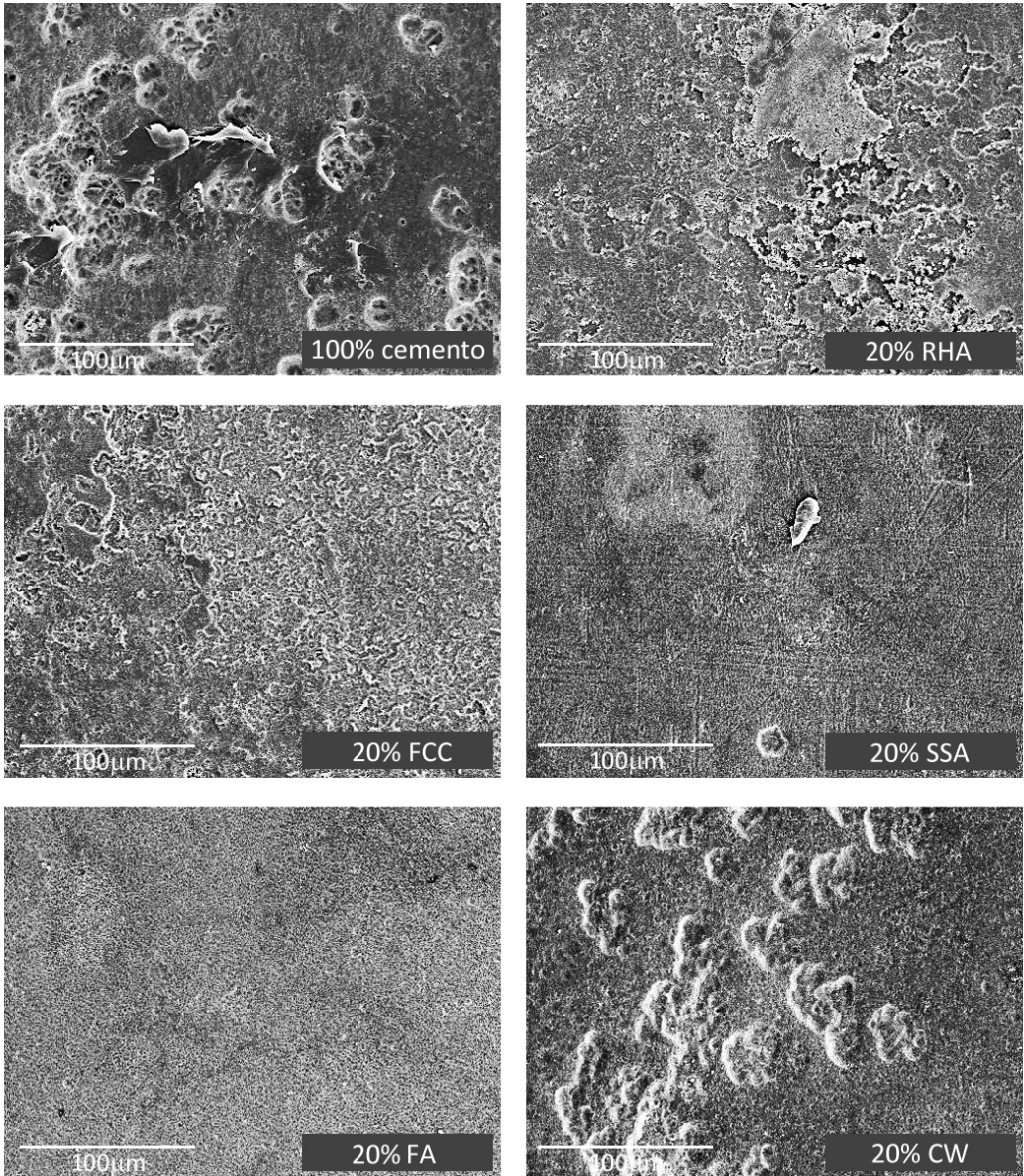




Figura 4.57 – Fibras de P-C en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

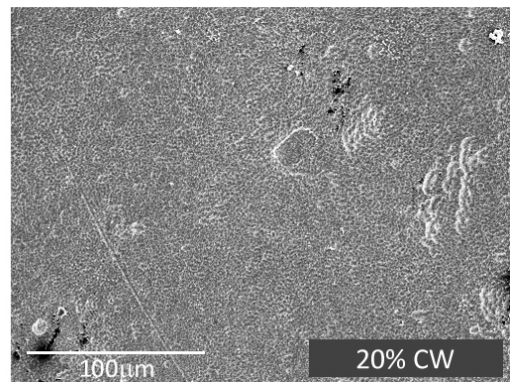
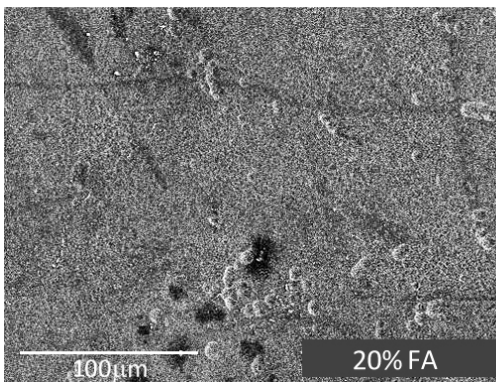
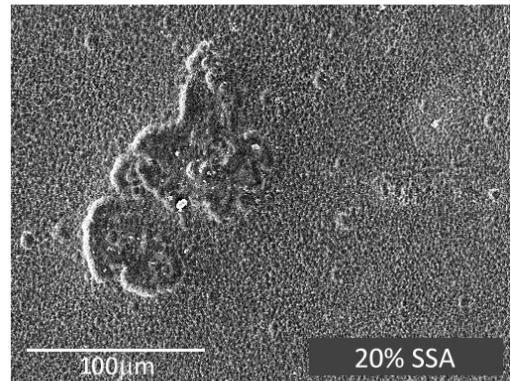
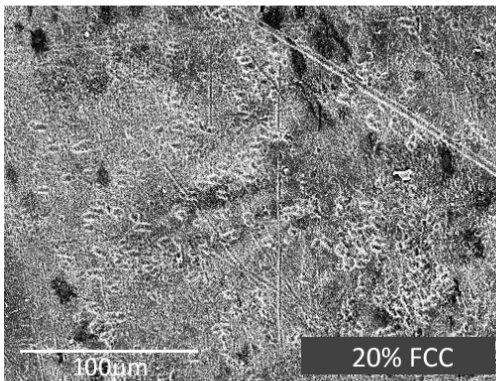
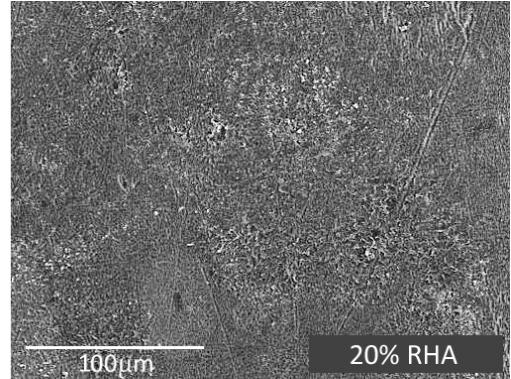
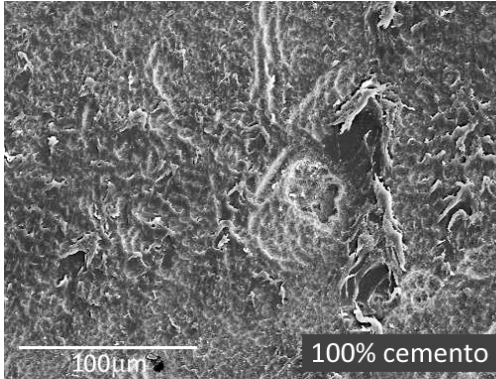


Figura 4.58 – Fibras de P-MF en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

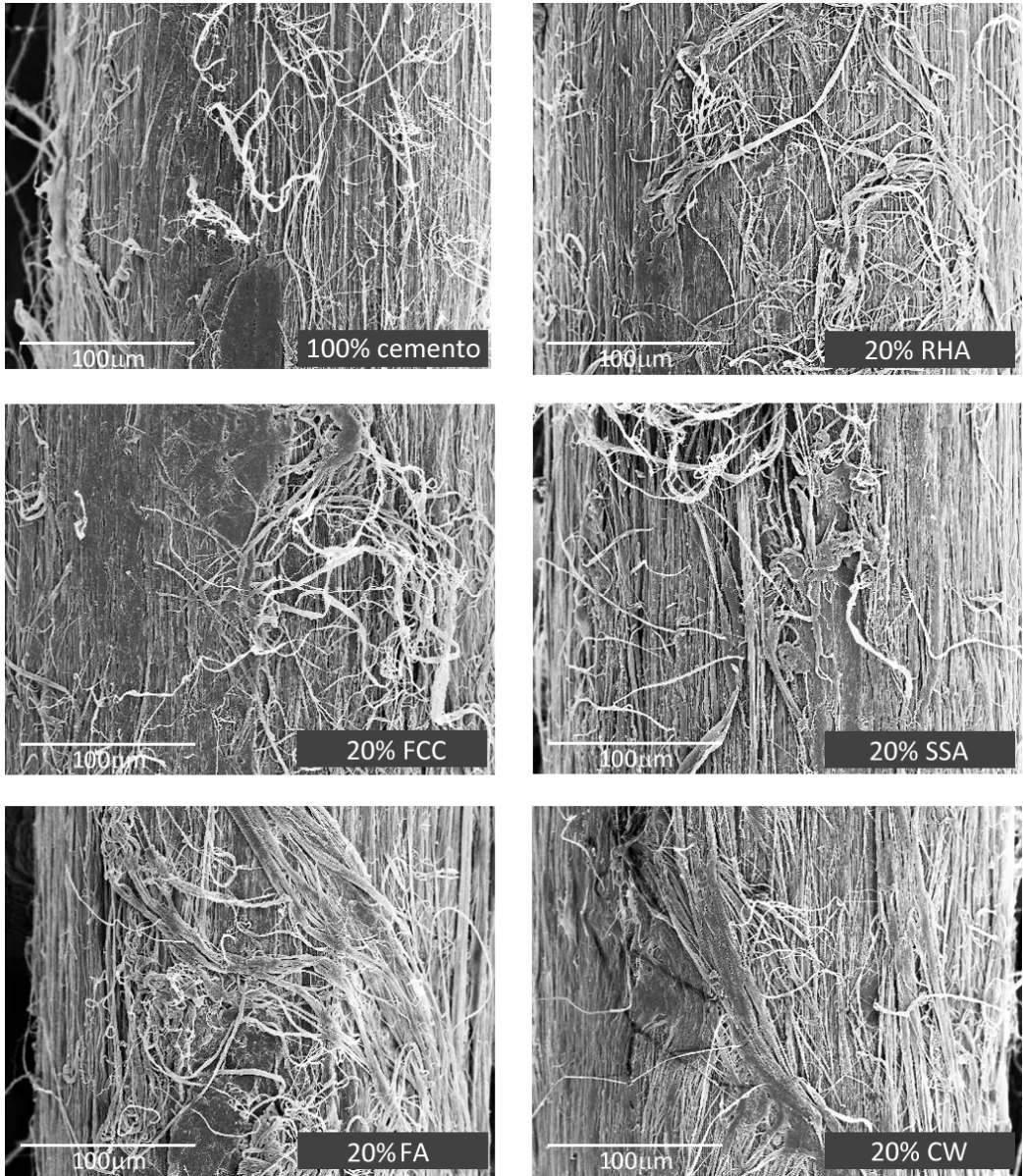


Figura 4.59 – Fibras de HDPE-L en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

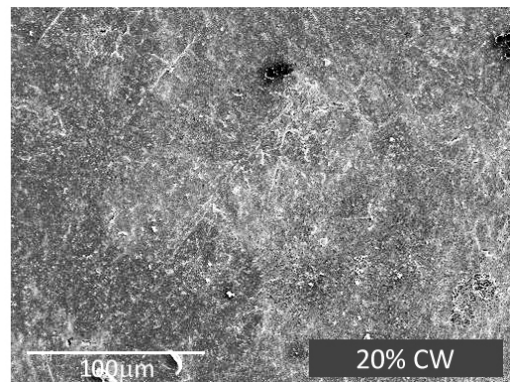
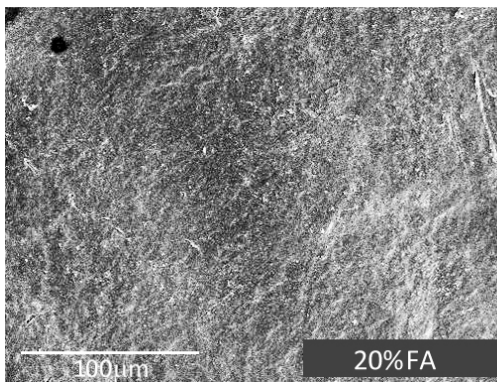
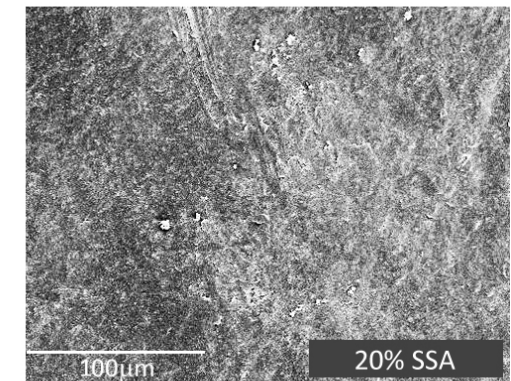
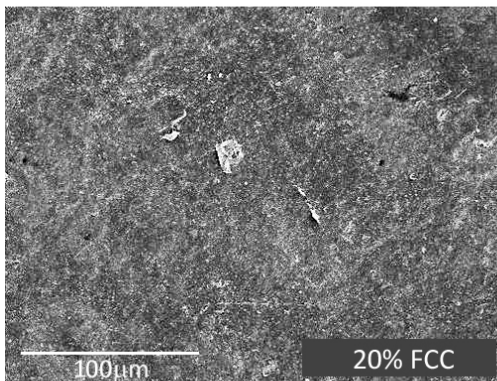
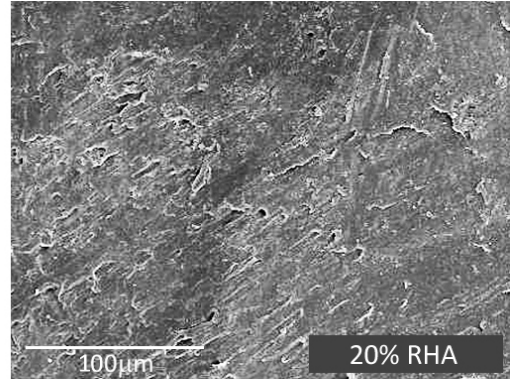
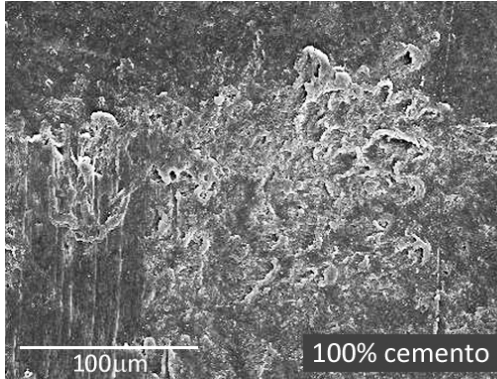


Figura 4.60 – Fibras de FO en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.

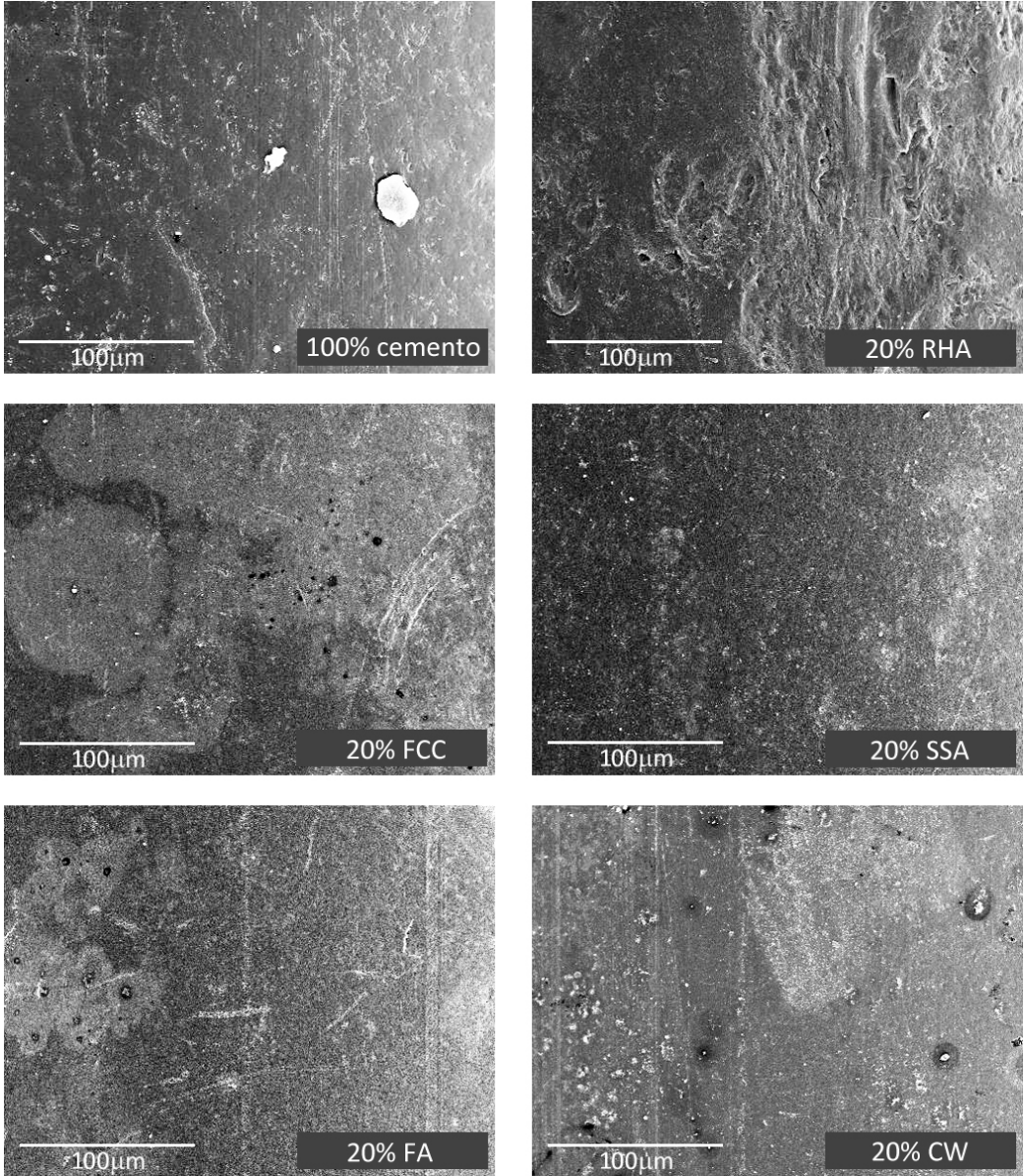
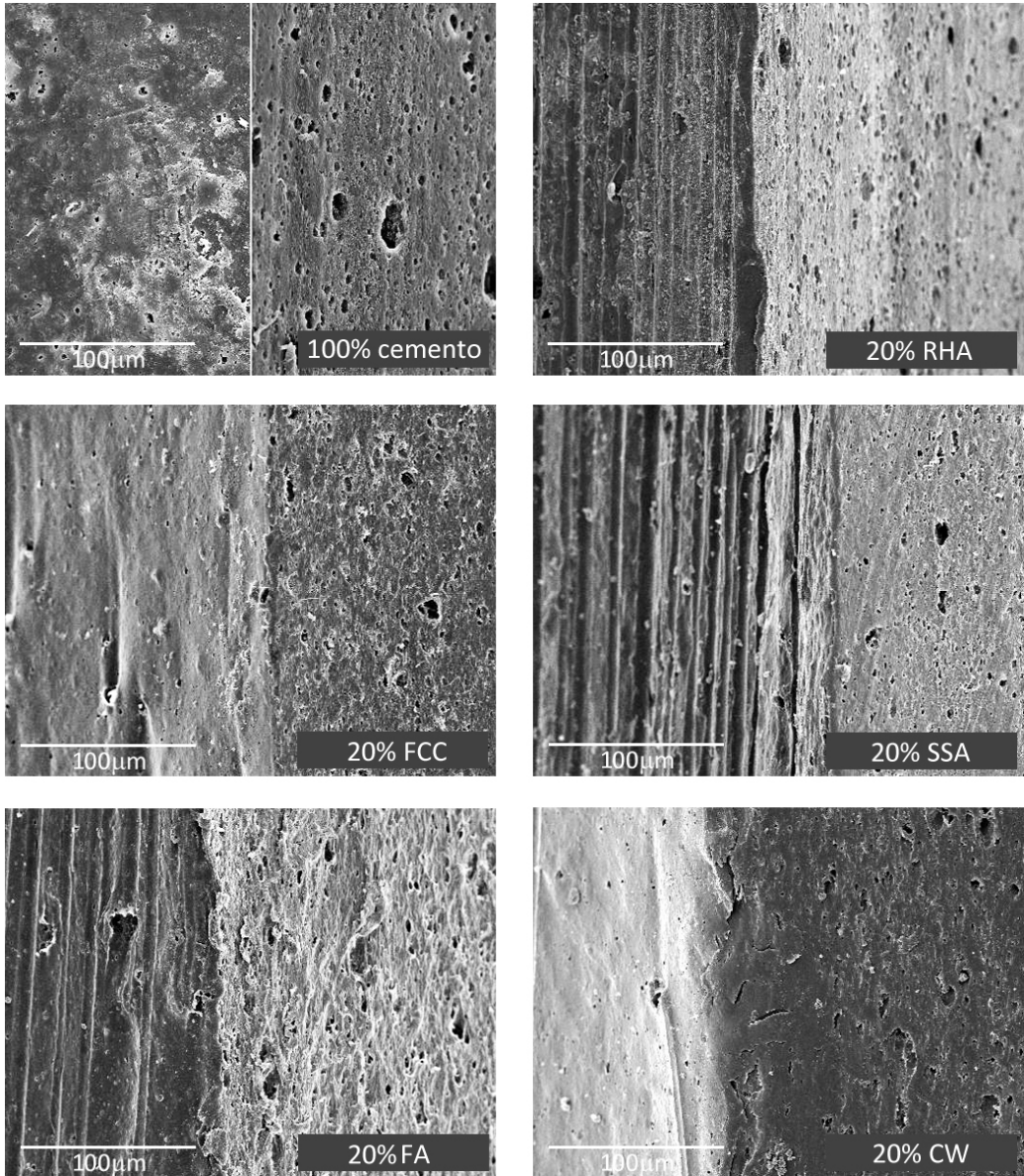


Figura 4.61 – Fibras de FP-FO en matrices estudiadas y curado en baño a 60 °C.



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

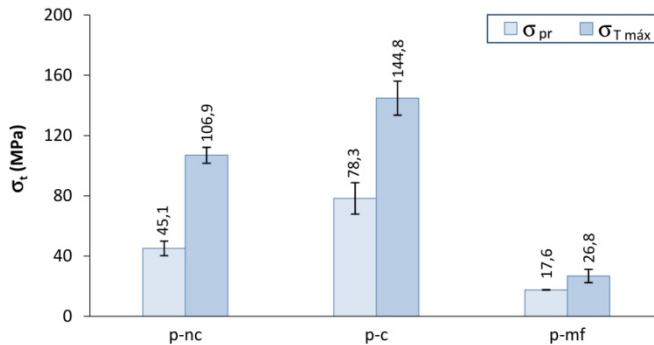
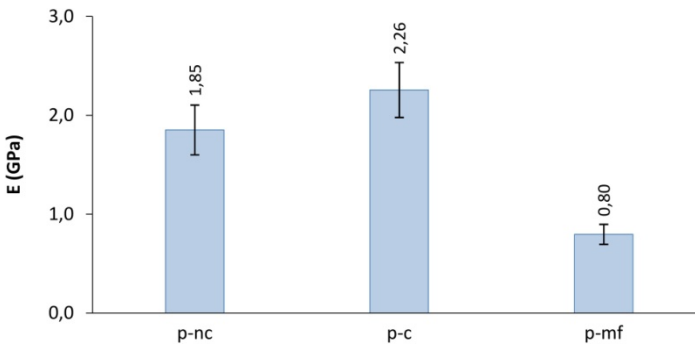


Figura 4.63 – Módulo Elástico a tracción de fibras de PET



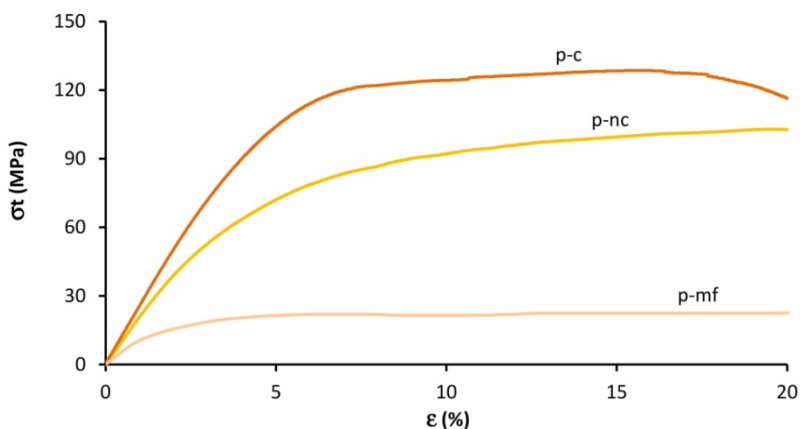
Como se ha mencionado en el Capítulo 1, los envases para bebidas carbonatadas además de ser más resistentes por la presión del gas que soportan necesitan ser más impermeables a los gases por lo cual su estructura es más rígida que la de los envases utilizados para bebidas no carbonatadas.

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

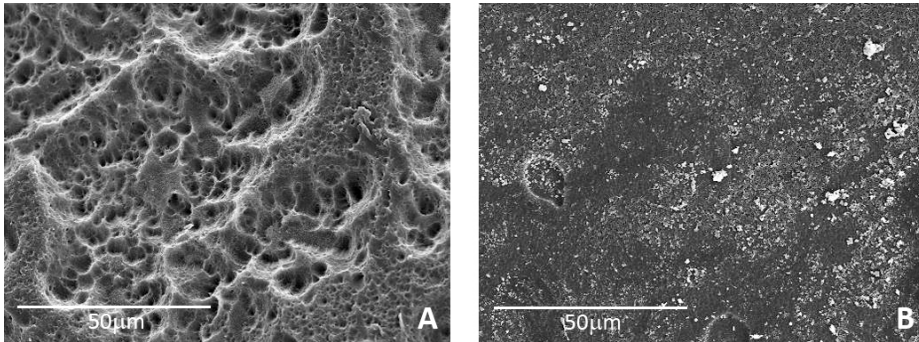
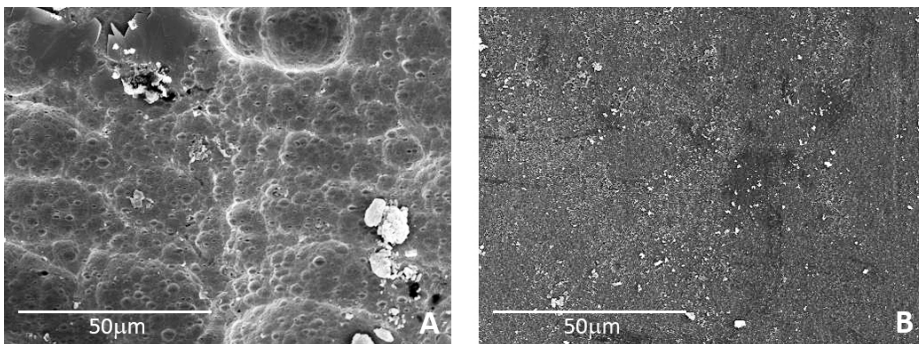


Figura 4.66 - Fibras P-C: degradación en pasta de cemento e hidróxido cálcico.  
A – en pasta cementicia ; B – en hidróxido cálcico



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

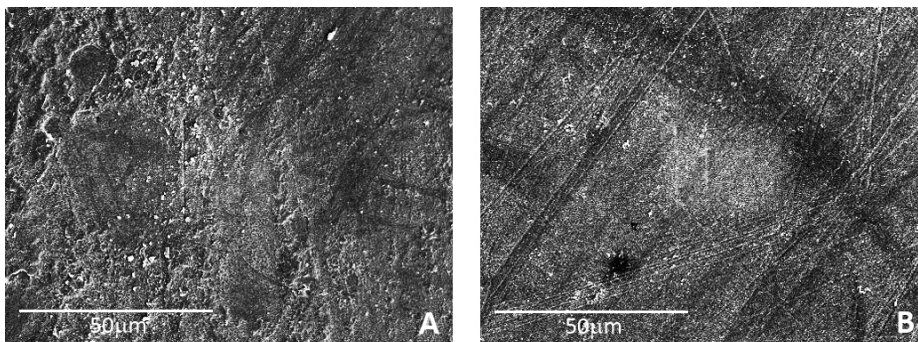
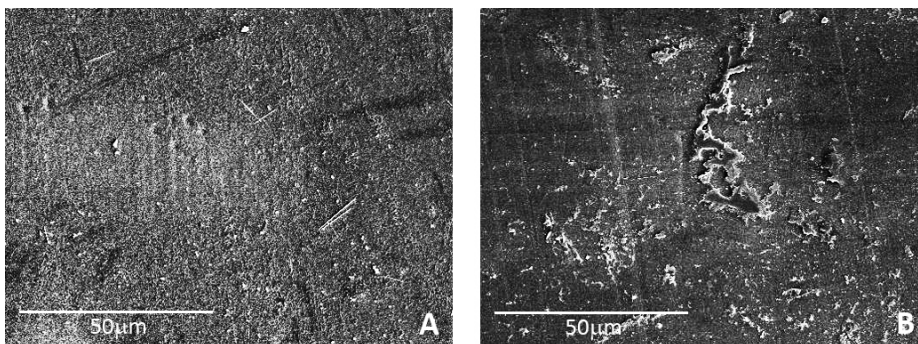


Figura 4.68 - Fibras P-C: degradación en soluciones saturadas.

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

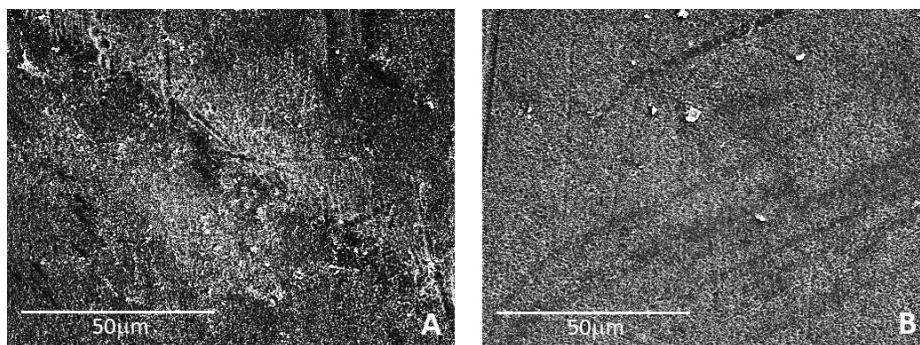


modificaciones por sí misma a las fibras al ser menor que la temperatura de transición vítrea de estos materiales

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

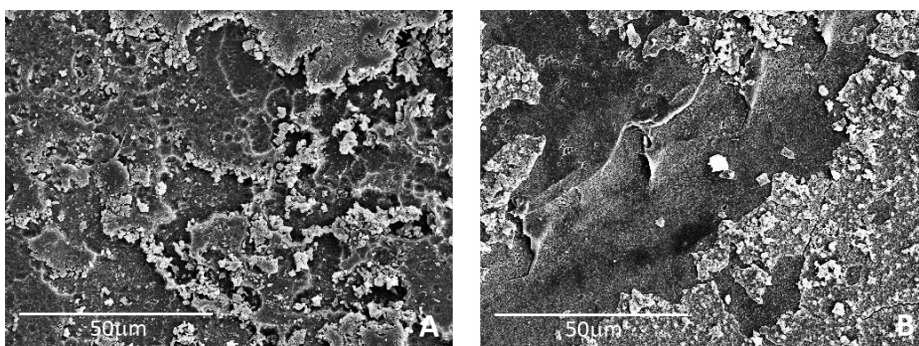


Figura 4.71 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-RHA) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% RHA; B – 50% cemento Pórtland + 50% RHA

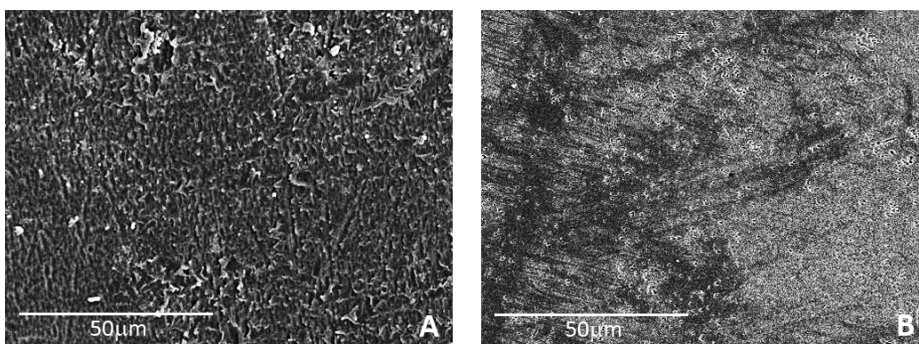


Figura 4.72 – Fibras P-NC en matrices mixtas (CP-FCC) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% FCC; B – 50% cemento Pórtland + 50% FCC

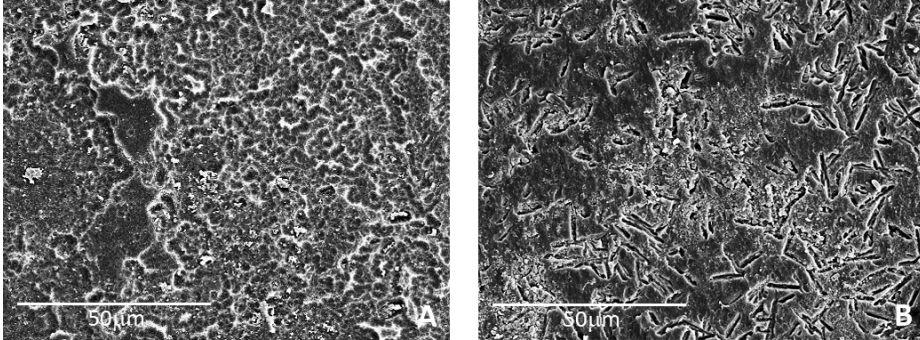
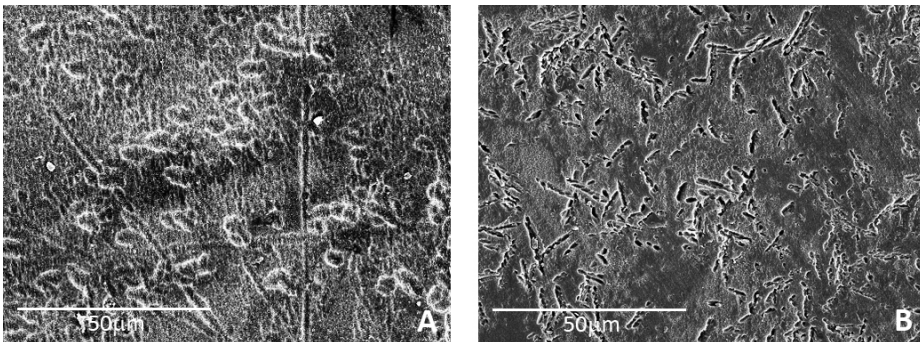


Figura 4.73 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-FCC) 15 días en baño 60 °C.  
A – 80% cemento Pórtland + 20% FCC; B – 50% cemento Pórtland + 50% FCC



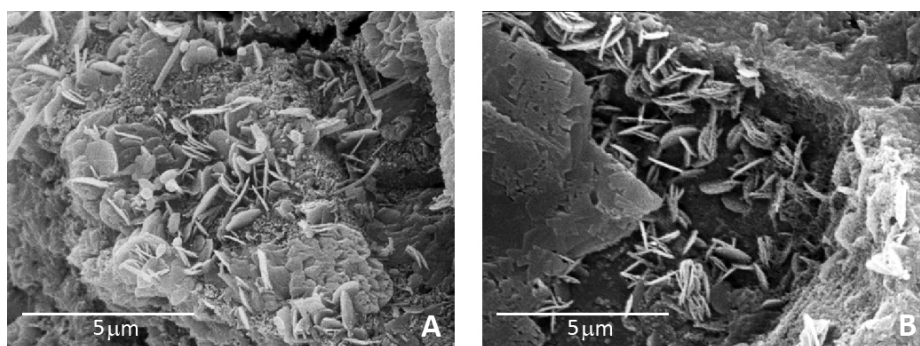
En general, la resistencia a flexotracción en morteros disminuye conforme aumenta el porcentaje de RHA adicionado o sustituido [29] por lo que estos valores son utilizados con el único fin de observar la degradación, sin afirmar que posean un buen desempeño desde el punto de vista mecánico.

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

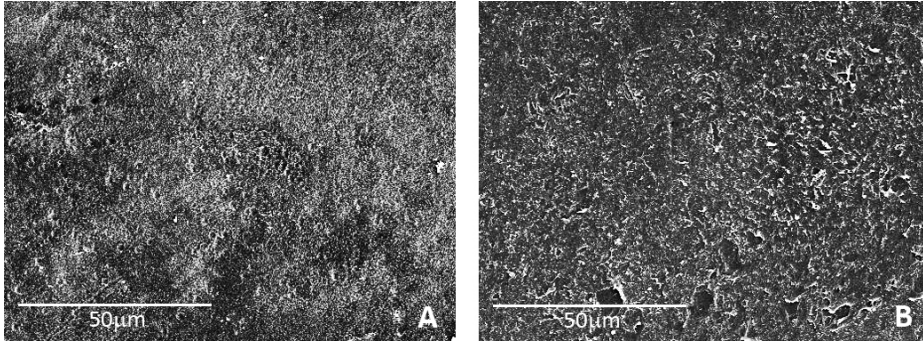
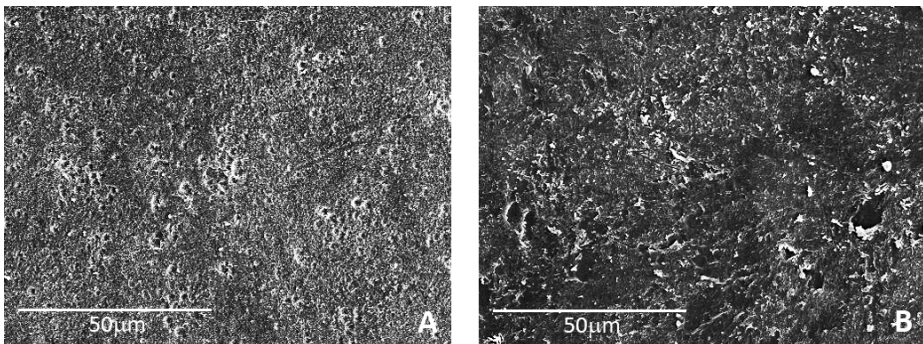


Figura 4.76 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 15 días en baño 60 °C.  
A – 50% cemento Pórtland + 50% SF; B – 50% cemento Pórtland + 50% MK



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

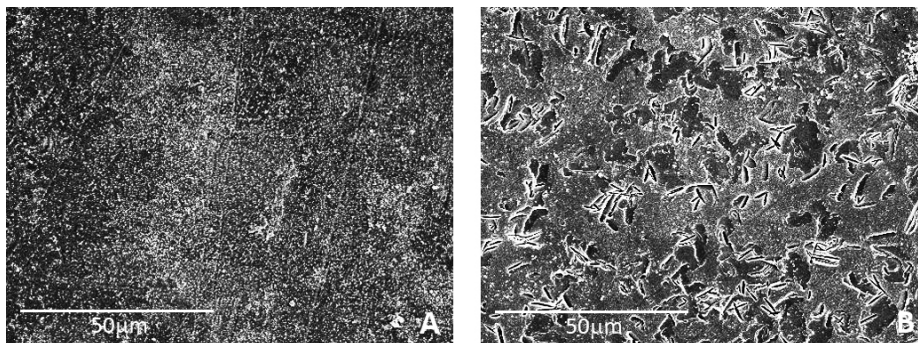
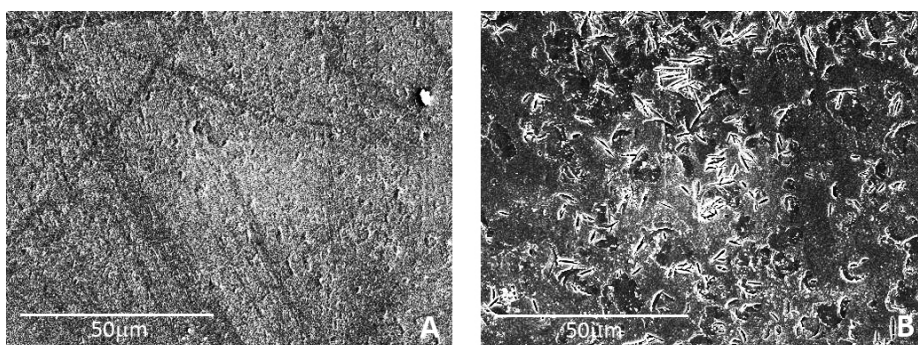


Figura 4.78 – Fibras P-C en matrices mixtas (CP-SF, CP-MK) 28 días en cámara húmeda.  
A – 50% cemento Pórtland + 50% SF; B – 50% cemento Pórtland + 50% MK



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

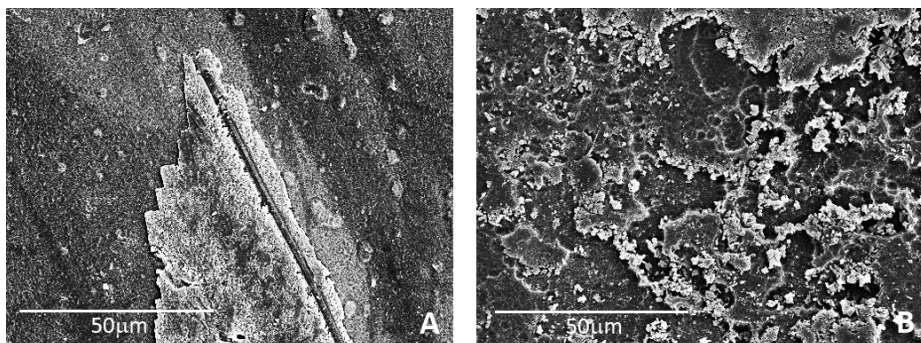
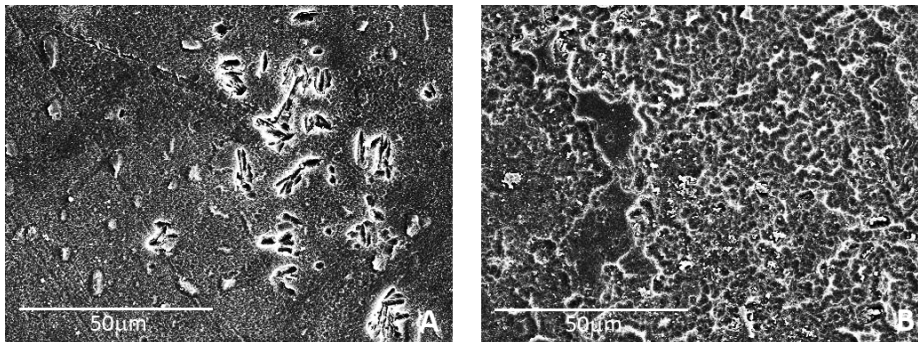


Figura 4.80 – Fibras P-NC en matrices mixtas 80%C+20%FCC comparación curado en baño.  
A – curado 15 días en baño 45 °C; B – curado 15 días en baño 60 °C



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

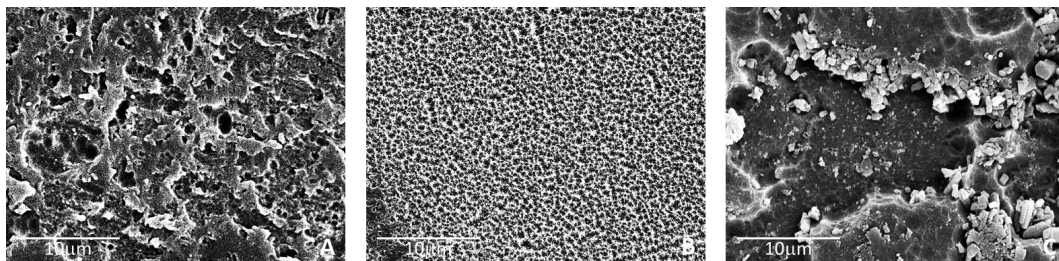
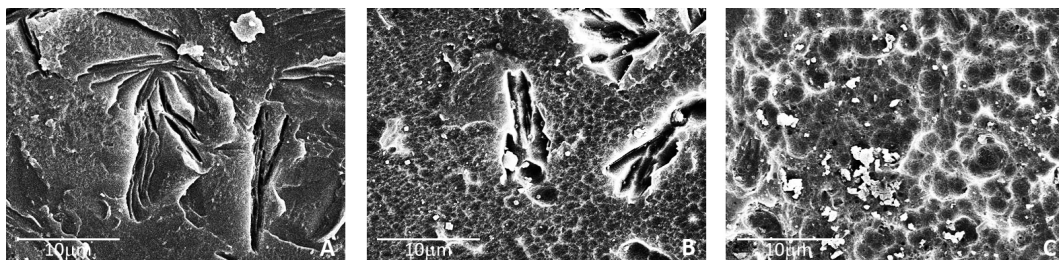


Figura 4.82 – Fibra P-NC en matrices mixtas 80% C + 20% FCC comparación curados.  
A - curado 28 días en cámara húmeda; B - curado 15 días en baño 45 °C; C - curado 15 días en baño 60 °C





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.

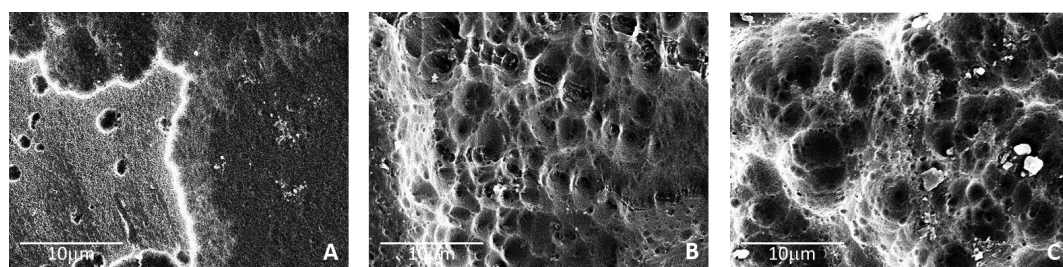
### Matriz de cemento Pórtland

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

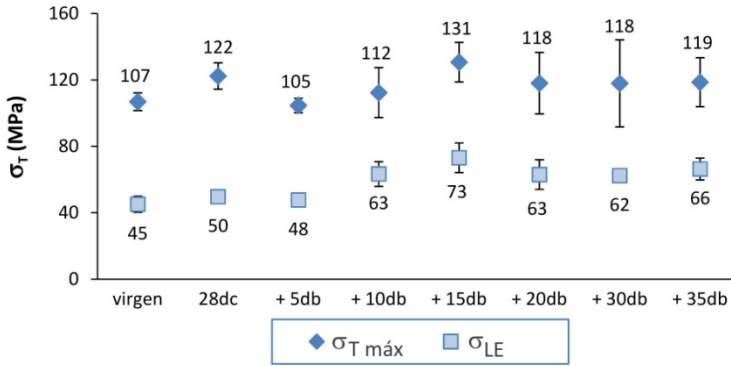
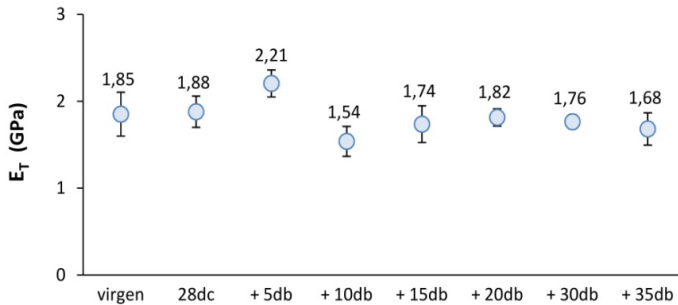


Figura 4.85 - Módulo elástico a tracción de fibras P-NC.

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 GPa / 78 GPa = 1,51).

Estos valores se han complementado con los obtenidos de muestras que se conservaron en la cámara húmeda ( $20 \pm 1$  °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

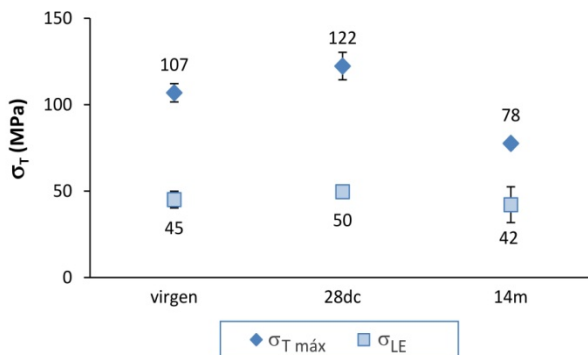
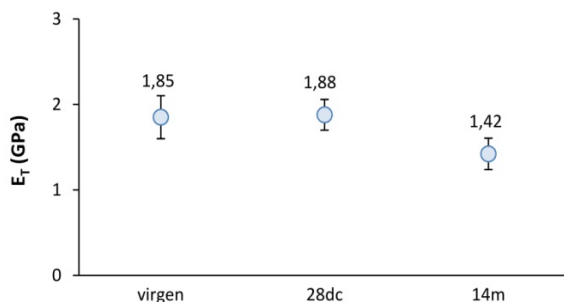


Figura 4.87 -Módulo elástico a tracción de fibras P-NC expuestas 14 meses a matriz cementicia. dc= días en cámara; m= meses



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

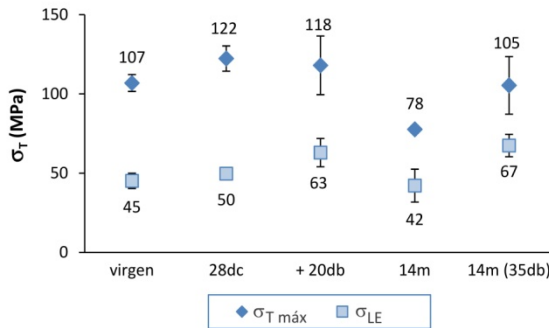
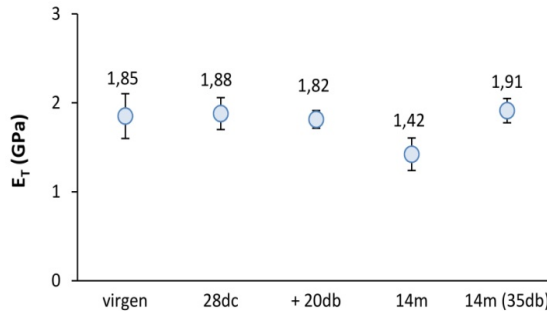


Figura 4.89 - Módulo elástico a tracción ( $E_T$ ) de fibras inmersas en matriz cementicia con edades entre 28 días y 14 meses.  
dc= días en cámara; db= días en baño; m= meses



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.

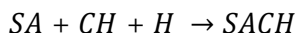
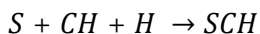
Con el fin de conocer el porcentaje de hidróxido cálcico presente en las pastas se utilizó la técnica de la termogravimetría y el análisis térmico diferencial.

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:



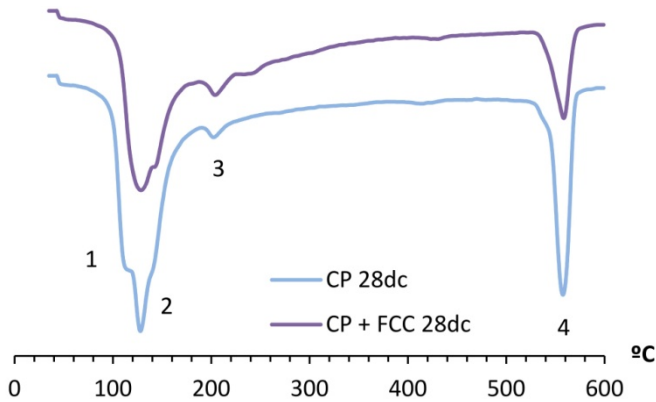
donde S, CH, A, SA, H es la nomenclatura de sílice, portlandita, alúmina, silico-alúmina y agua respectivamente, y SCH, ACH y SACH es la nomenclatura de silicato cálcico hidratado, aluminato cálcico hidratado y silicoaluminato cálcico hidratado, respectivamente.

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.

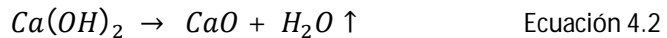
Figura 4.90 – Curva DTG con principales procesos de pérdida de masa en pasta cementicia y pasta mixta.



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.

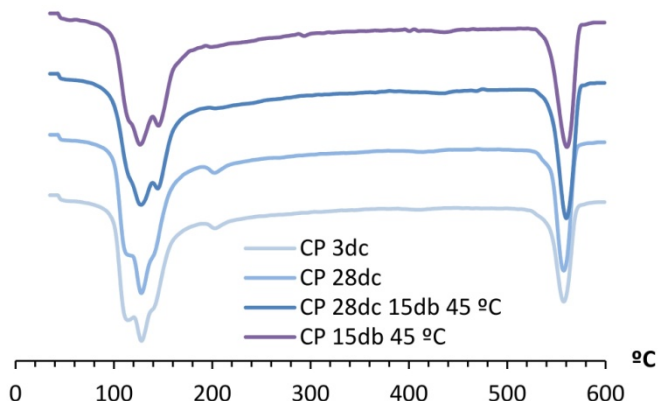
### Pasta cementicia según curado

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

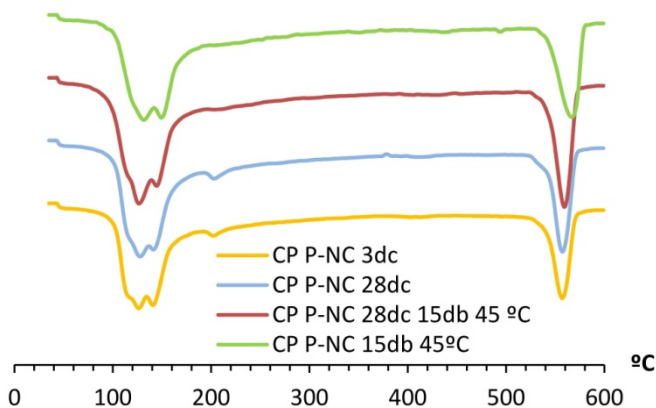
Bajo la hipótesis de que la portlandita reacciona con el polímero en el proceso de degradación, se analizaron las pastas cementicias provenientes de las muestras utilizadas en la observación de fibras mediante SEM.

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

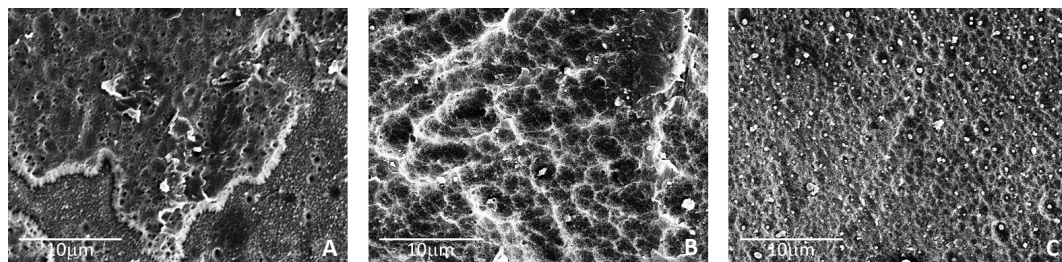
<b>muestra</b>	<b>% H<sub>2</sub>O combinada</b>	<b>% CH presente</b>
<b>CP P-NC 3dc</b>	15,97	10,6
<b>CP P-NC 28dc</b>	18,55	12,5
<b>CP P-NC 28dc 15db 45 °C</b>	19,87	14,4
<b>CP P-NC 15db 45 °C</b>	18,18	13,7

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

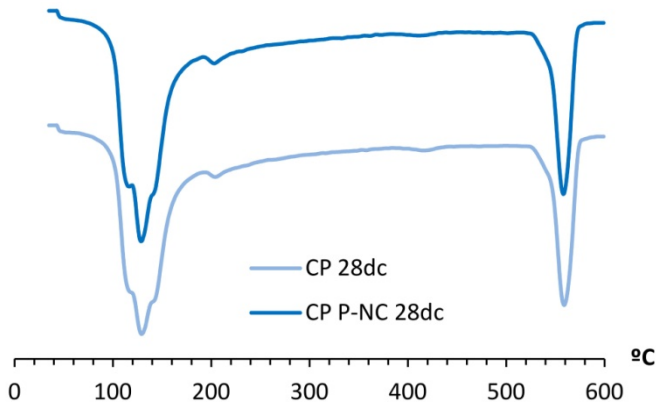


Tabla 4.11 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento Pórtland, espesor 2,5 mm, en contacto con fibras P-NC.  
dc = días de curado en cámara húmeda

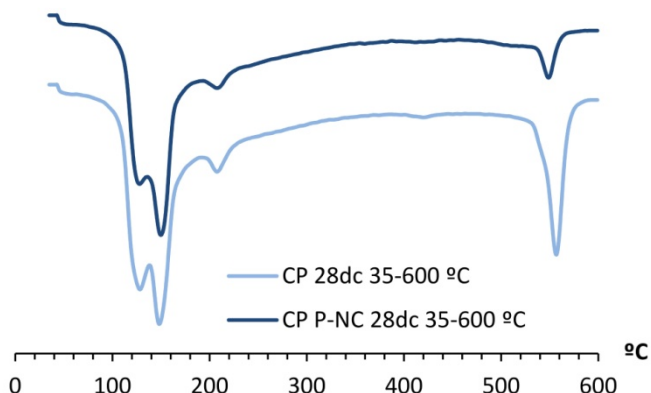
muestra	% H <sub>2</sub> O combinada	% CH presente
CP 28dc e=2,5mm	19,53	13,8
CP P-NC 28dc e=2,5mm	20,00	13,3

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

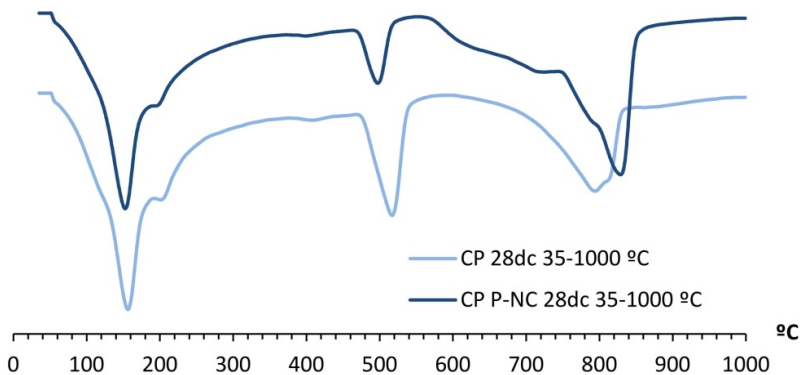
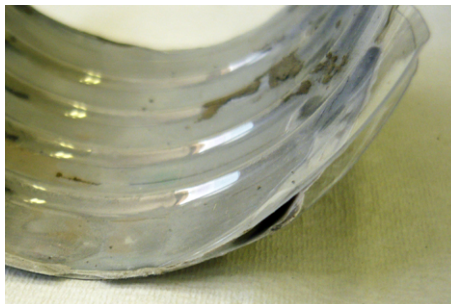


Figura 4.97 - Pasta de cemento Pórtland entre piezas de P-NC





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

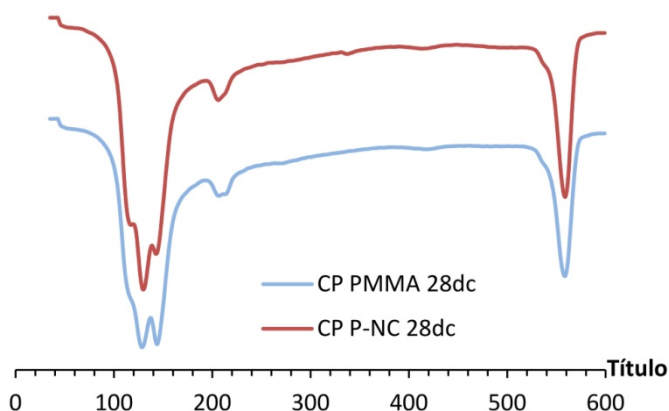


Tabla 4.13 - Porcentajes de agua combinada y CH presente en pastas de cemento, en contacto con PMMA y P-NC.  
dc = días de curado en cámara húmeda

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

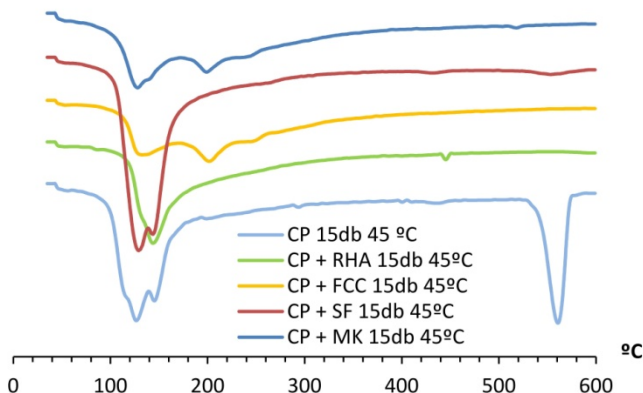


Tabla 4.14 - Porcentajes de agua combinada, CH presente y cal fijada en pastas mixtas con 50% de sustitución, curadas 15 días en baño a 45 °C.  
db= días de curado en baño

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).

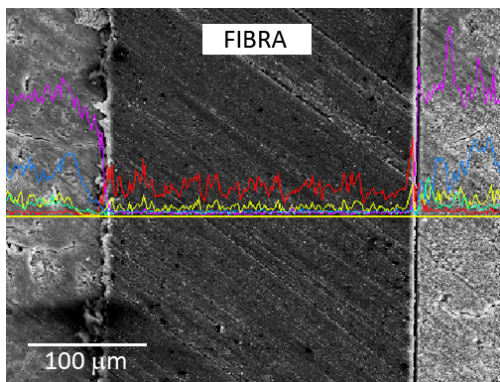
Este detector recibe los rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones y como la energía de cada radiación X es característica de cada elemento, podemos obtener información semi-cuantitativa por áreas, del tamaño que deseemos, de la superficie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

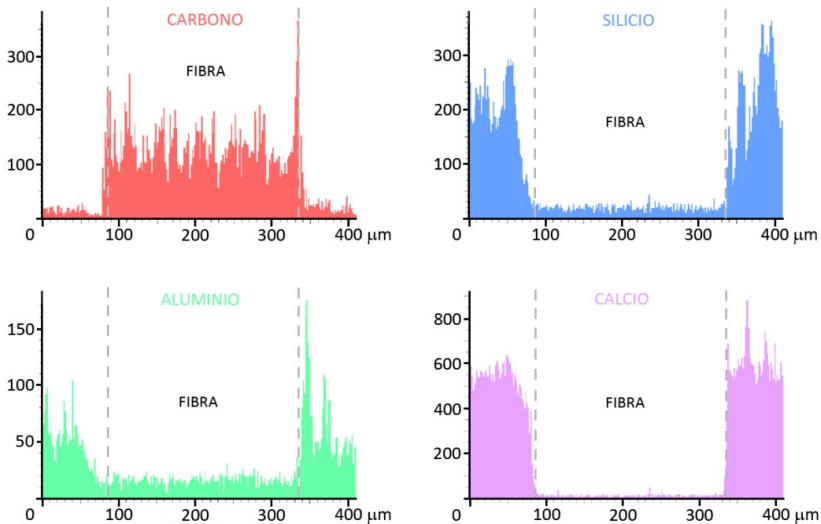
Figura 4.100 - Micrografía y microanálisis por EDS de interfaces matriz/fibra/matriz en compuesto con matriz de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC)  
(los elementos a los que corresponden los espectros EDS se encuentran en la Figura 4.101)



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

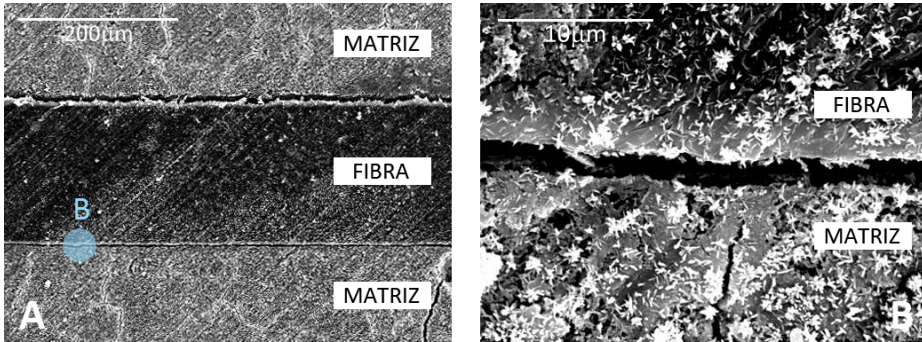
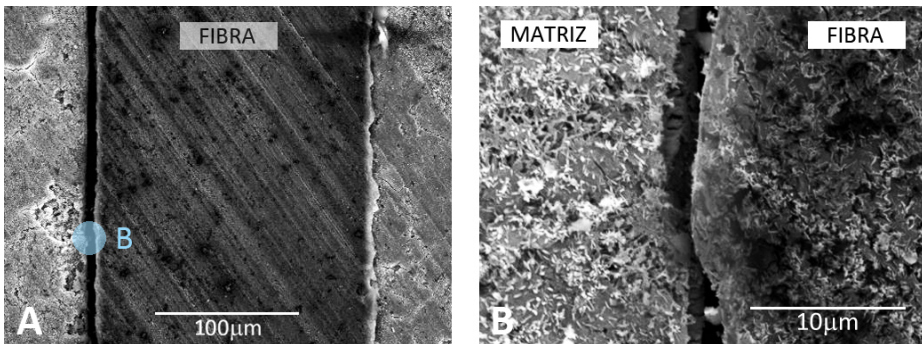


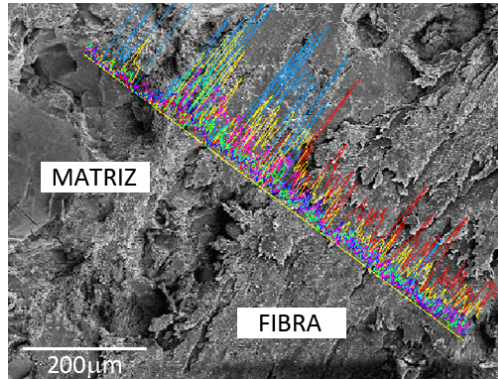
Figura 4.103 - Micrografía de interfaz separada en pasta de cemento Pórtland y fibra P-NC  
A – vista general de las interfaces; B – detalle de ruptura de interfaz



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.

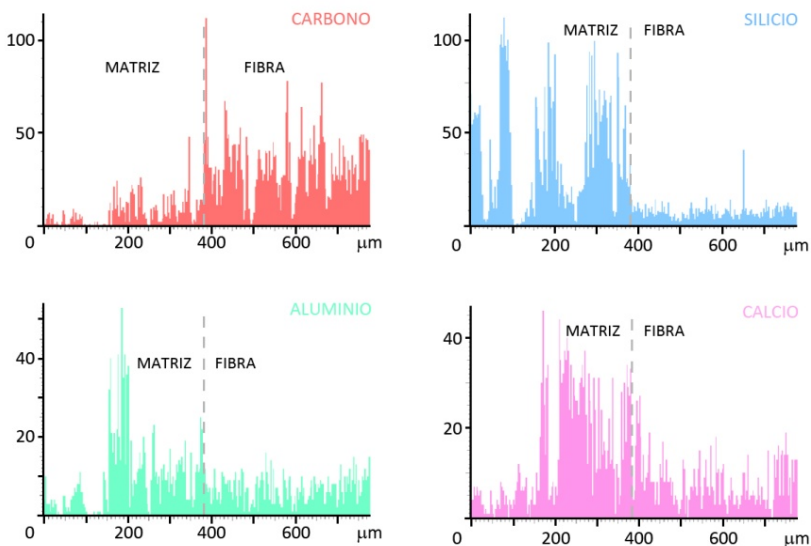
Figura 4.104 - Micrografía y microanálisis por EDS de interfaces matriz/fibra en mortero de cemento Pórtland reforzado con fibras de PET (P-NC)



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.

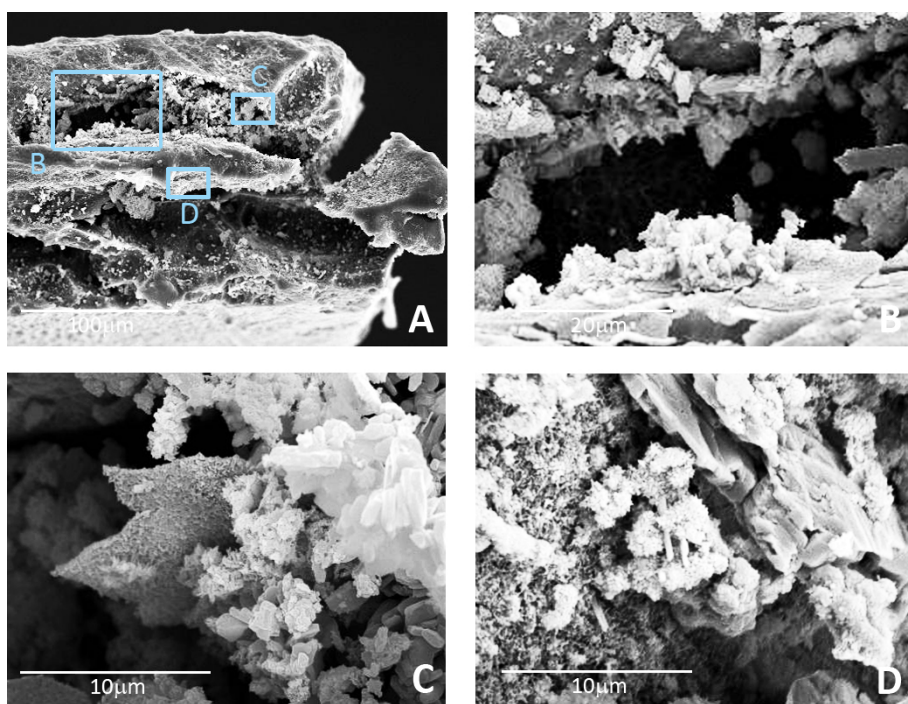
Figura 4.105 - Espectros de los principales elementos detectados por microanálisis EDS en interfaces de mortero de cemento Pórtland y fibras de PET (P-NC).



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.

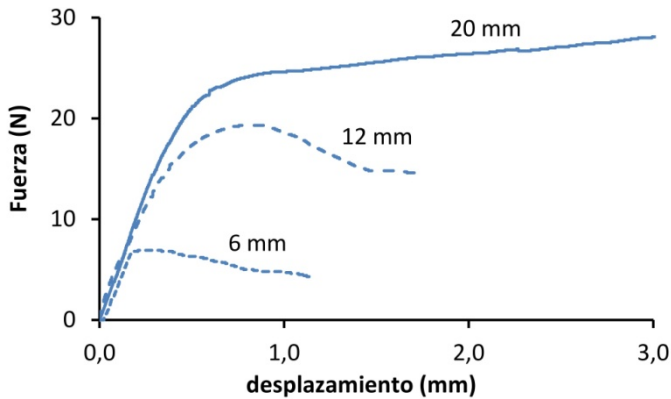
#### 4.2.3.3 Ensayo de pull-out simple

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.



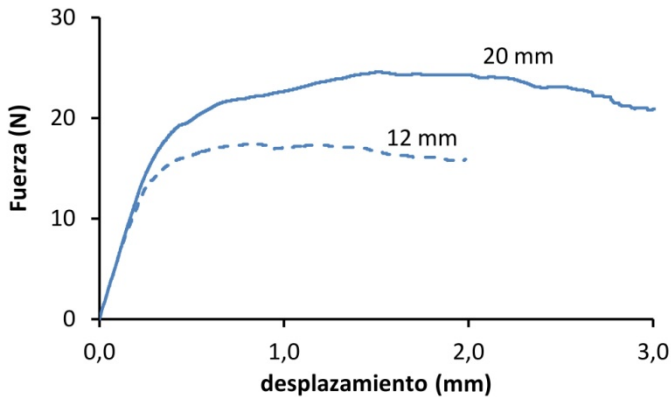
En las muestras con longitud de fibra embebida de 20 mm se produjo la rotura del 50% de las muestras al alcanzar los 3 mm de desplazamiento, por lo que se toma éste como valor de finalización del ensayo y dimensión de la mitad de la longitud crítica a los 7 días de curado.

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

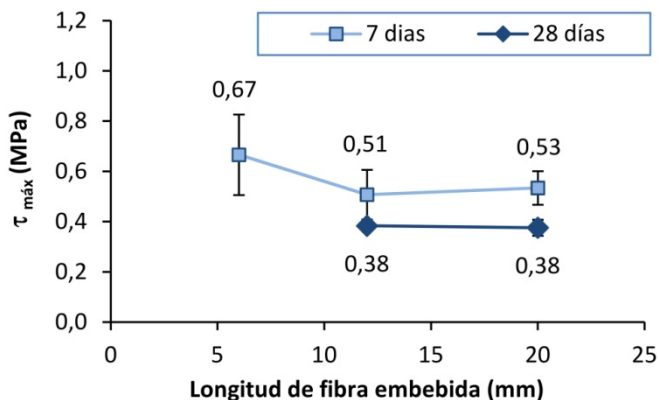
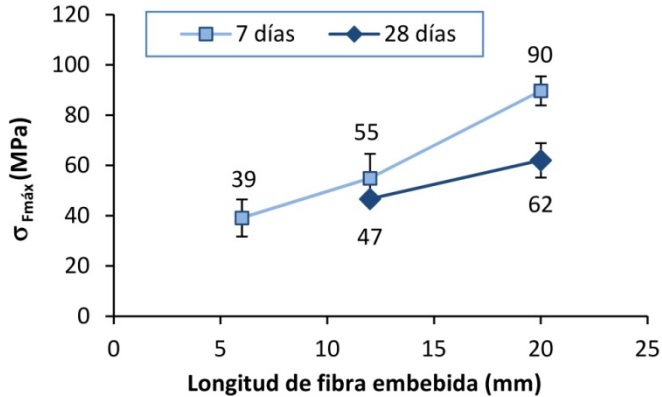


Figura 4.110 – Pull-out - tensión máxima producida en la fibra con distintas longitudes y a distintas edades de curado



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.

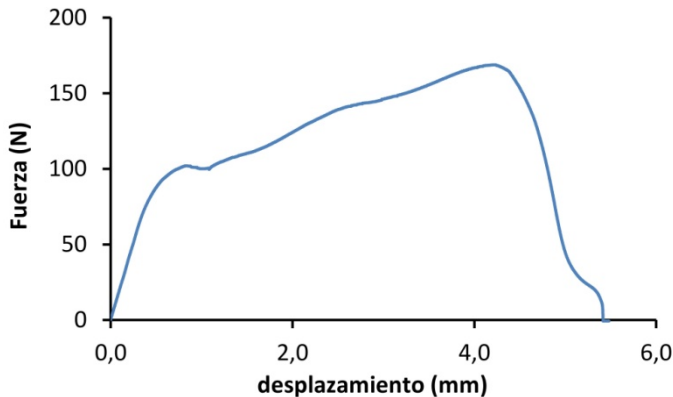
#### 4.2.3.4 Ensayo de pull-out doble

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

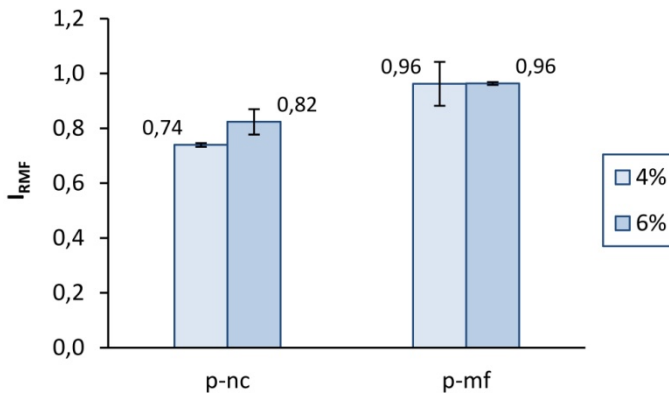
Para determinar la resistencia a flexión se realizó el ensayo a tres puntos según procedimiento indicado en Norma UNE-EN 196-1:2005 [5] y desarrollado en el punto 3.3.7.1.

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.

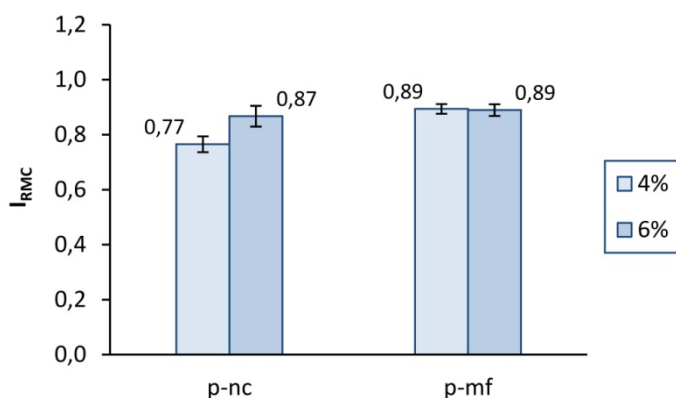
#### 4.2.4.2 Resistencia a compresión

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.

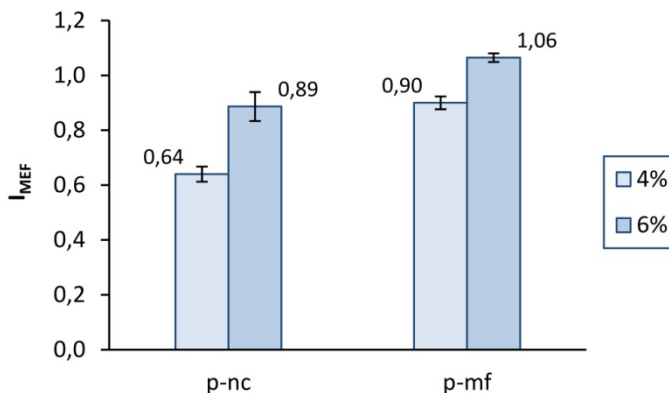
#### 4.2.4.3 Módulos elásticos

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,

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

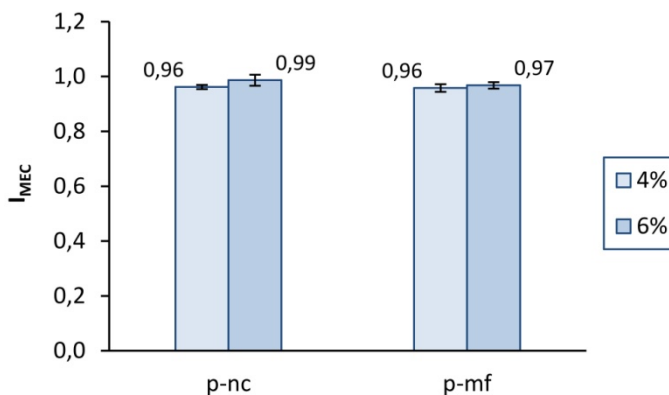
donde  $\sigma$  es la tensión,  $E$  el módulo elástico y  $\varepsilon$  la deformación, las muestras elaboradas con fibras P-NC son más elásticas que las reforzadas con fibras multifilamentos (P-MF). Esto implica que ante un mismo valor de esfuerzo se deforman más o lo que es lo mismo, para producir 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  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ .

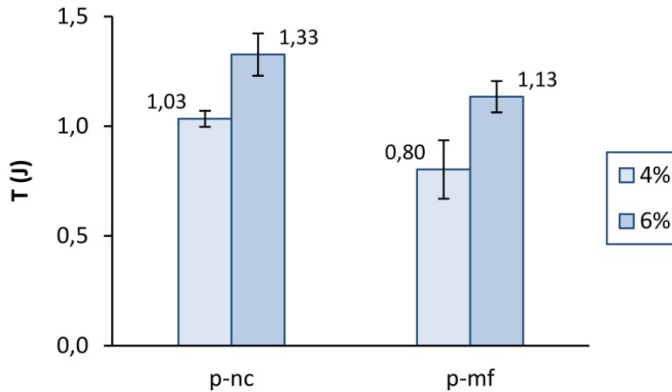


Figura 4.117 - Índices de tenacidad ( $I_n$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , 4%.

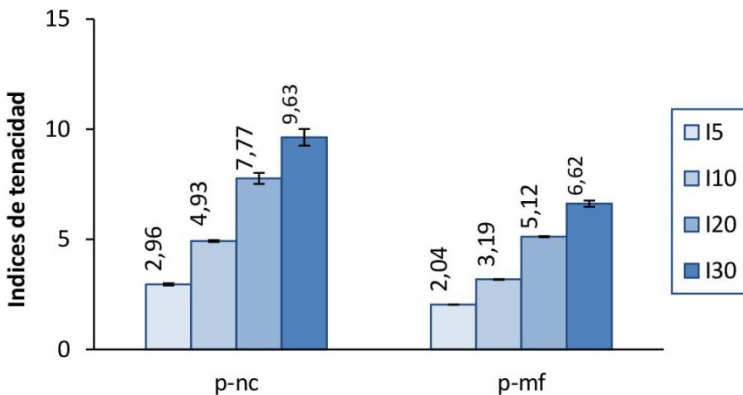
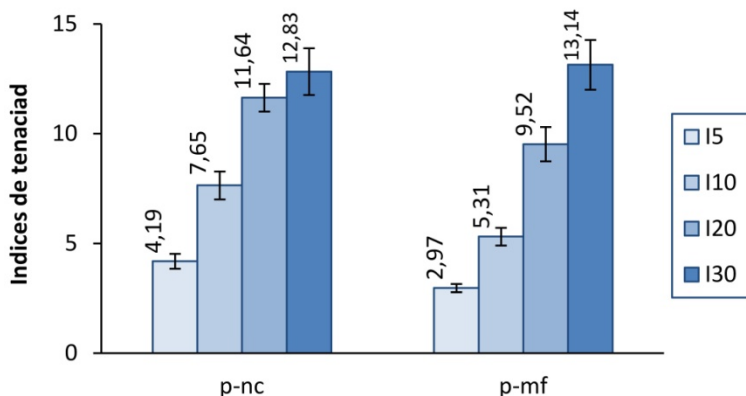


Figura 4.118 - Índices de tenacidad ( $I_n$ ) a 28 días de mortero de cemento fibro-reforzado en probetas de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>, 6%.



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.

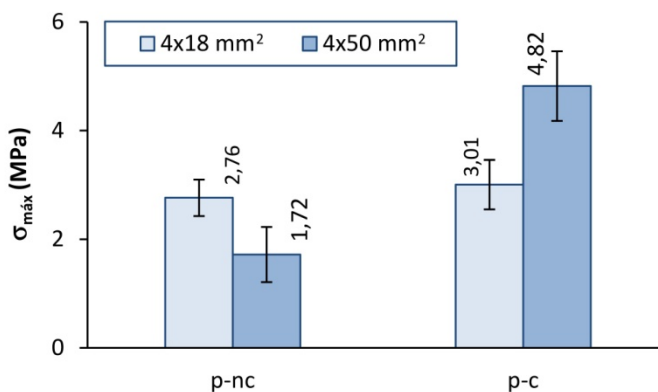
#### 4.2.5.1 Resistencia a flexión

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 x 5 x 1 cm<sup>3</sup> obtenidas por corte de placas de 35 x 35 x 1 cm<sup>3</sup>)





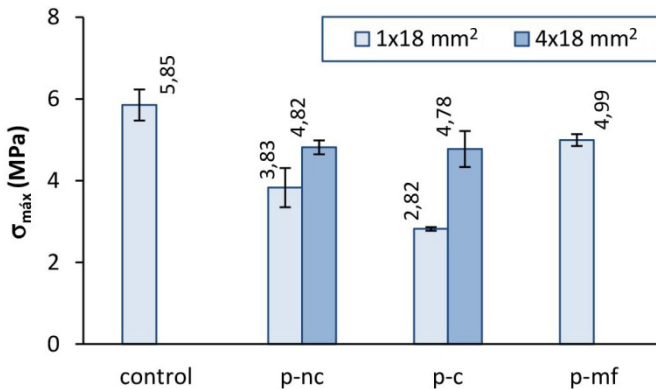
En estos valores se observa que los resultados obtenidos con las fibras P-C son mayores a los que nos proporcionan las fibras P-NC.

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.

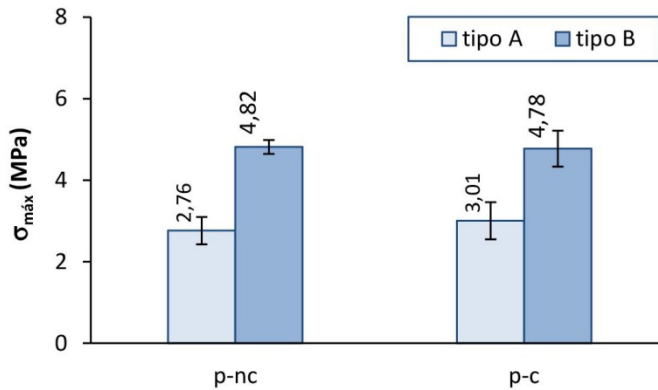
Figura 4.120 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{F\text{m}\acute{a}\text{x}}$ ) en muestras tipo B (tamaño  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)



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%.

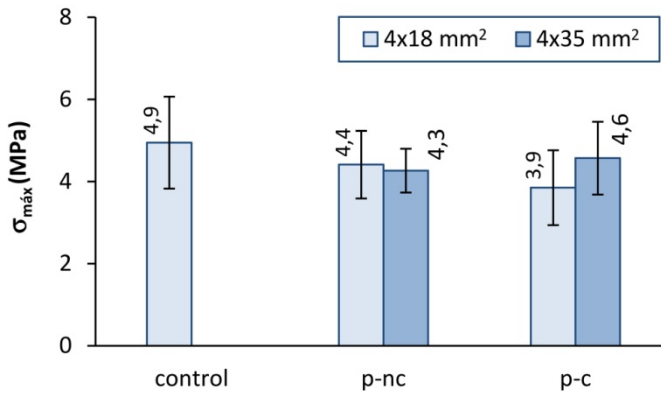
Estas diferencias podrían confirmar la hipótesis de que el corte realizado con la sierra, con disco de 3 mm de espesor, ha producido tensiones y microfisuras en las muestras que se traducen en un resultado bastante menor al alcanzando con muestras obtenidas directamente con esa dimensión.

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)



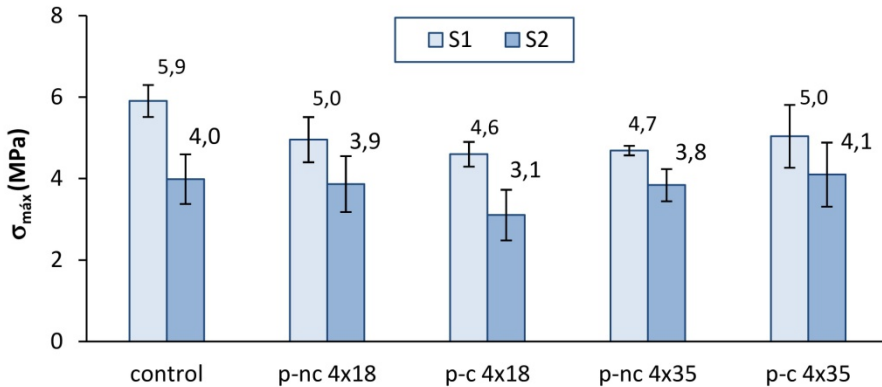
En general, el coeficiente de variación de los valores obtenidos es del orden de 20%, excepto en las fibras P-NC de  $4 \times 35 \text{ mm}^2$  donde es un poco menor, 12%. En base a que estos valores corresponden a la media de medidas realizadas en ambas direcciones, se han procesado los datos obtenidos 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.

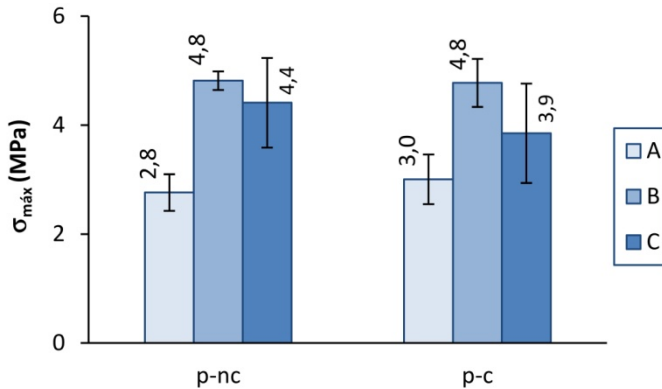
La primera está relacionada con el vibrado utilizado en el momento de producción de las mismas. La mesa vibradora empleada presenta una dirección principal de movimiento que puede producir una orientación en el material, justificando este razonamiento que los mayores valores se obtienen en la sección 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].

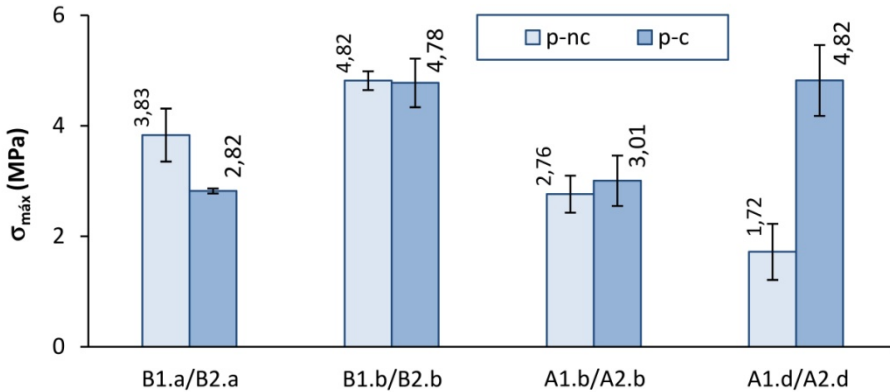
Por último, en la Figura 4.125 se representan los resultados obtenidos comparando las prestaciones de ambas fibras procedentes del corte de envases post-consumo, P-NC y P-C, en los tres tamaños utilizados en muestras de 22,5 x 5 x 1 cm<sup>3</sup> con sus variantes en cuanto a forma de obtención de las 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.

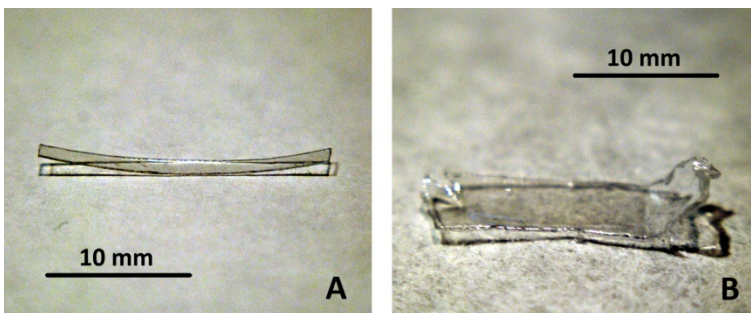
Figura 4.125 - Resistencia a flexión ( $\sigma_{\text{máx}}$ ). Comparativa fibras P-NC / P-C en muestras A y B. (características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)



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.



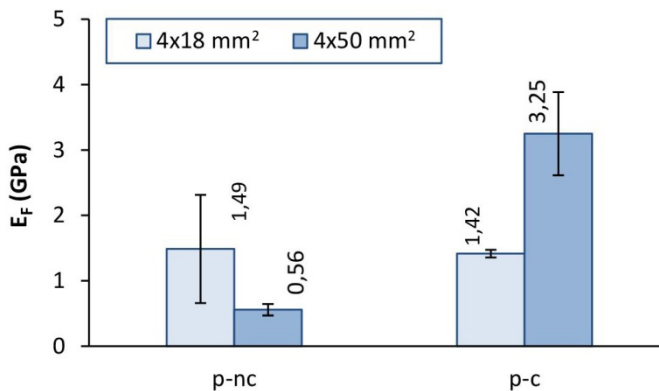
#### 4.2.5.2 Módulo elástico

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.

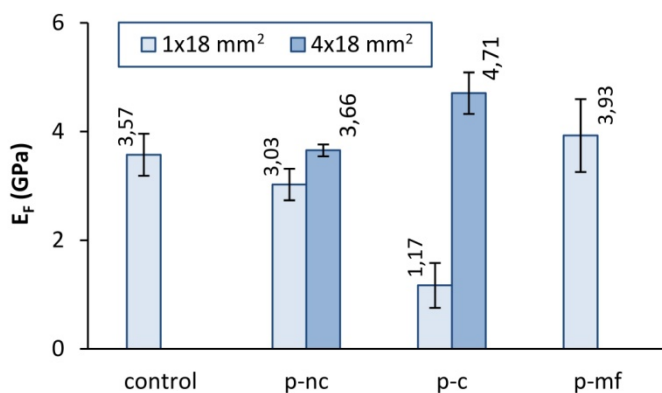
Figura 4.127 - Módulo elástico a flexión ( $E_F$ ) en muestras tipo A.  
(tamaño  $22,5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  obtenidas por corte de placas de  $35 \times 35 \times 1 \text{ cm}^3$ )



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)



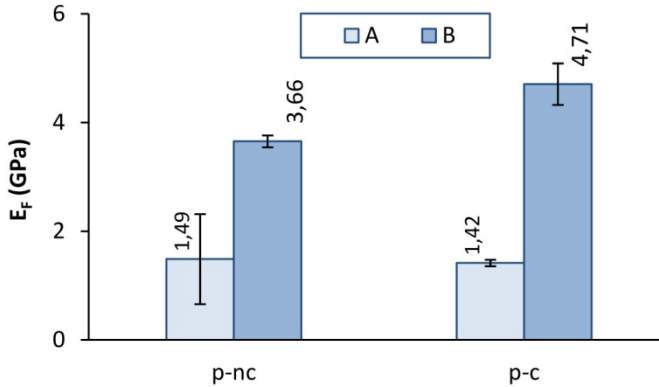
En base a estos resultados los morteros reforzados con las fibras de 1 mm de ancho de envases post-consumo producen un material compuesto más elástico a flexión que la muestra control, y las fibras de 4 mm de ancho lo opuesto, similar con las fibras de P-NC y 30% mayor al utilizar fibras provenientes 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)

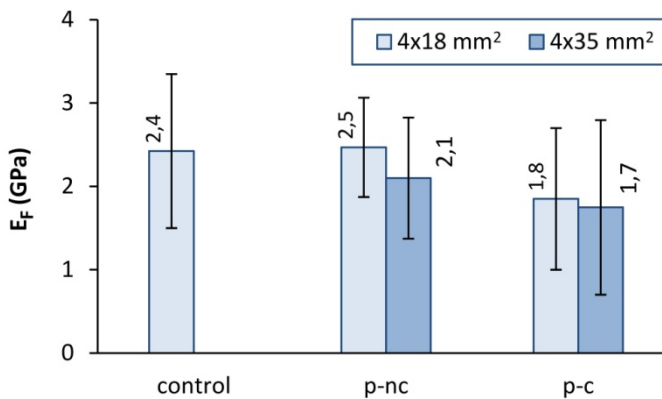
Las elasticidades obtenidas en muestras que se han obtenido por corte de placas de mayor tamaño presentan un módulo elástico a flexión mucho menor que las muestras que se obtuvieron con moldes de igual tamaño.

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.

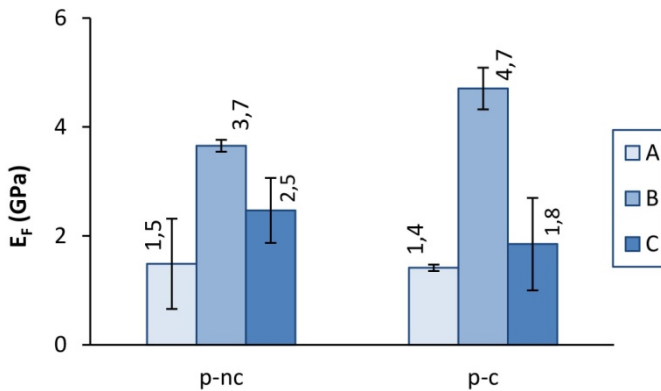
Figura 4.130 - Módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) en muestras tipo C. (tamaño 24 x 24 x 1 cm<sup>3</sup> realizadas en moldes de igual dimensión)

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 x 18 mm<sup>2</sup> 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 4x18 mm<sup>2</sup>.



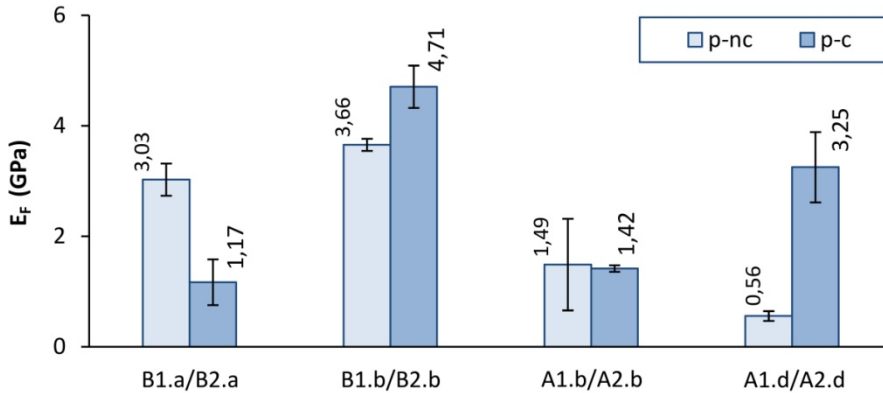
No se reconoce un patrón de comportamiento según el tipo de PET utilizado, presentando, en las muestras tipo B, mayor elasticidad realizadas con P-NC mientras con las muestras tipo C ocurre lo opuesto.

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 x 5 x 1 cm<sup>3</sup>, 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 x 18 mm<sup>2</sup>, 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 x 50 mm<sup>2</sup>. 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.

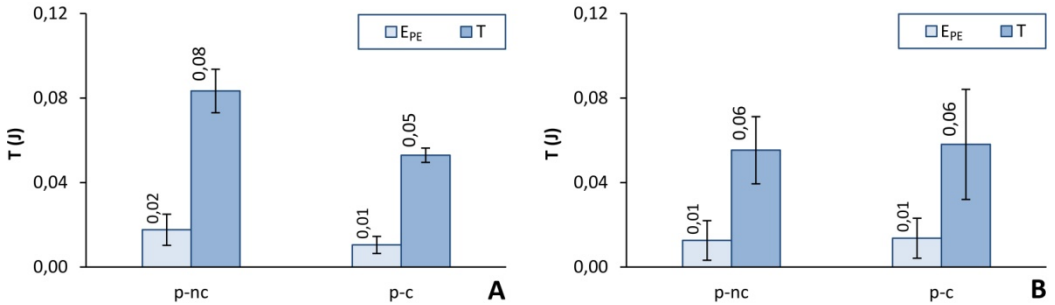
#### 4.2.5.3 Tenacidad

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.

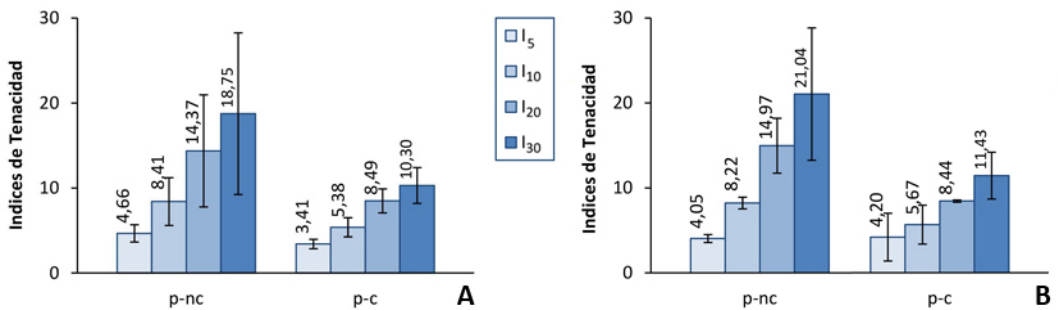
Figura 4.133 – Energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras tipo A.  
A – fibras de 4 x 18 mm<sup>2</sup>; B – fibras de 4 x 50 mm<sup>2</sup>



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>



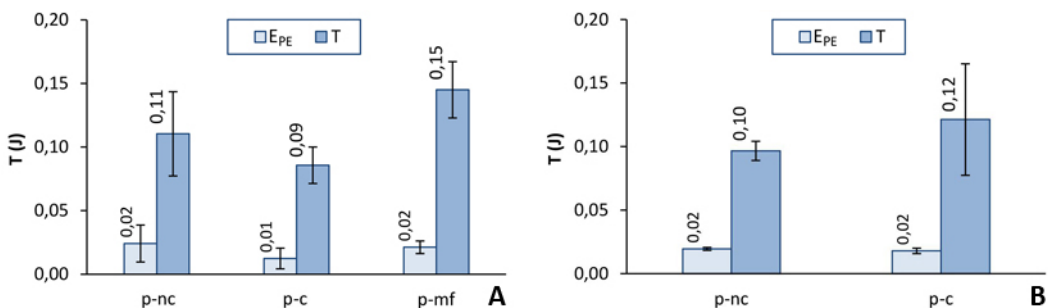
Si analizamos los índices de tenacidad se observa que en ambas dimensiones de fibras los valores son similares dentro del tipo de PET utilizado, siendo ligeramente mayor el  $I_{30}$  en las fibras de 50 mm de longitud.

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 las 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.

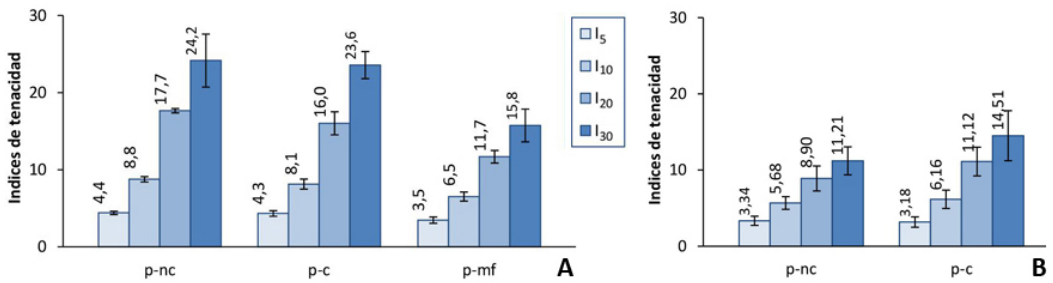
Figura 4.135 – Energía en periodo elástico ( $E_{PE}$ ) y Tenacidad (T) en muestras tipo B.  
A – fibras de  $1 \times 18 \text{ mm}^2$  y P-MF de 18 mm de longitud ; B – fibras de  $4 \times 18 \text{ mm}^2$



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)

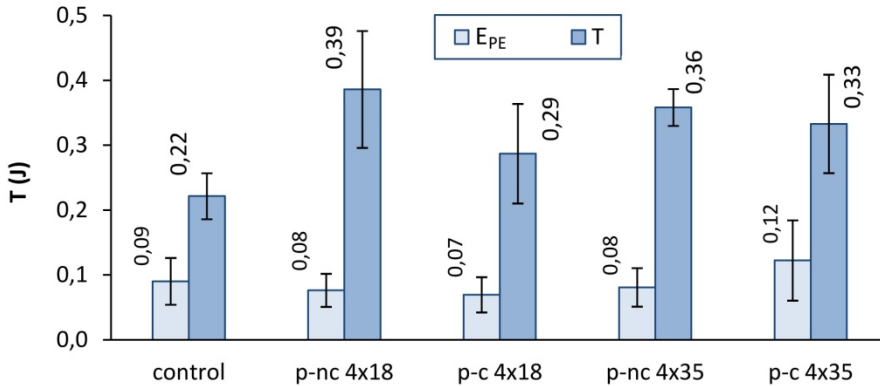
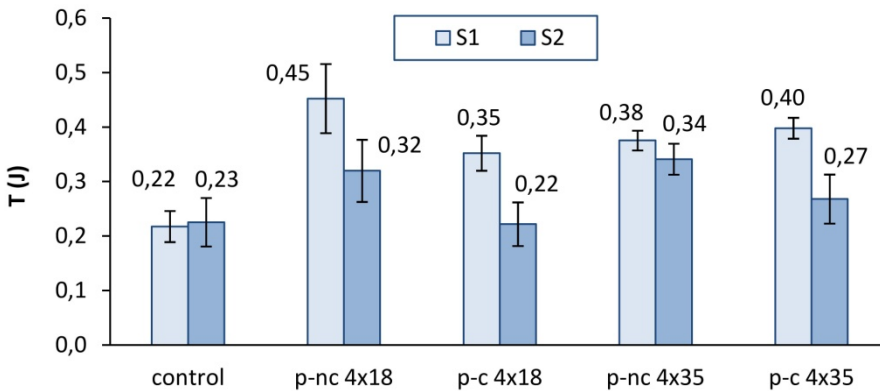


Figura 4.138 – Tenacidad ( $T$ ) en muestras tipo C, comparación de ambos sentidos. (tamaño  $24 \times 24 \times 1 \text{ cm}^3$  realizadas en moldes de igual dimensión)



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.

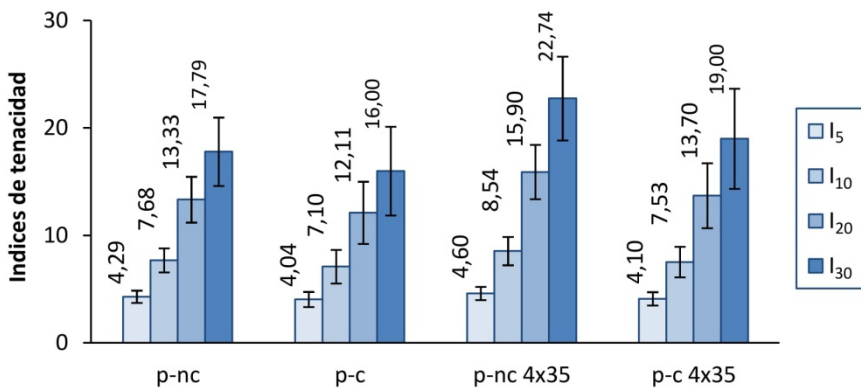
Los porcentajes de desviación de resultados se distribuyen, en general, equitativamente entre ambas direcciones mostrando una distribución bastante homogénea del material.

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)

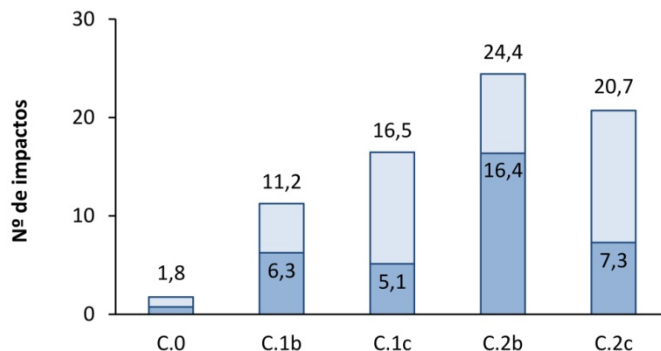
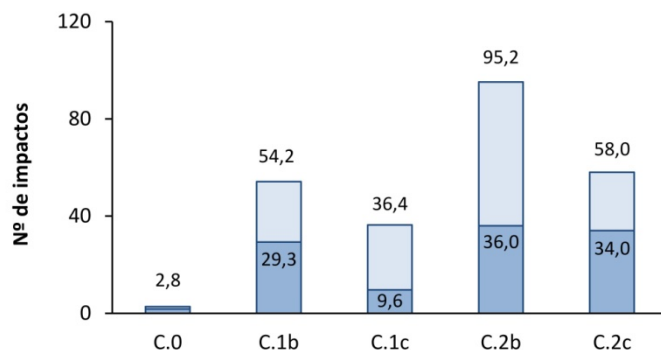


Figura 4.141 - Número de impactos para producir la rotura. Máximos y mínimos. (características de las muestras indicadas en Tabla 4.15)

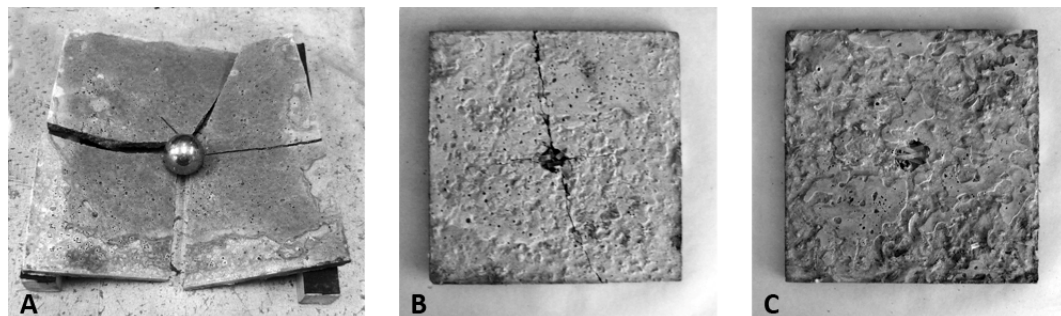


En el manual mencionado [49] el número mínimo de impactos deseables para una teja es uno, por lo que todas las muestras, incluyendo la muestra control, superan esa condición.

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

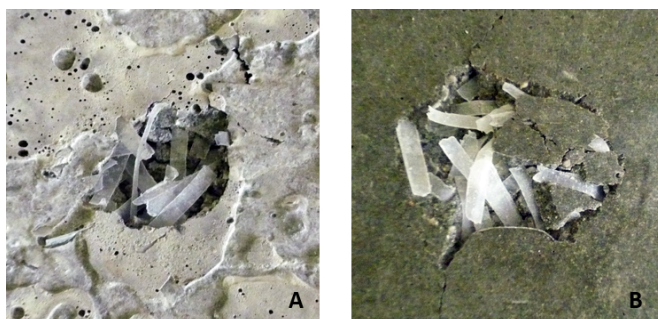


Se observó que la muestra control tuvo una rotura frágil, sin deformación previa, quedando fragmentada en trozos de número y dimensión variable según la muestra.

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.

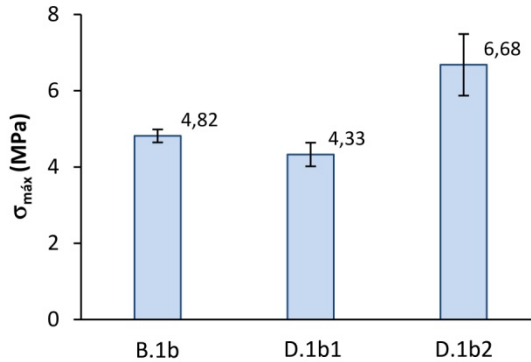
muestra	Dimensión (cm <sup>3</sup> )	tamaño fibra (mm <sup>2</sup> )	curado en cámara	curado en baño a 45 °C
<b>D.1b1</b>	22,5 x 5 x 1	4 x 18	28	-----
<b>D.1b2</b>	22,5 x 5 x 1	4 x 18	28	28

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)

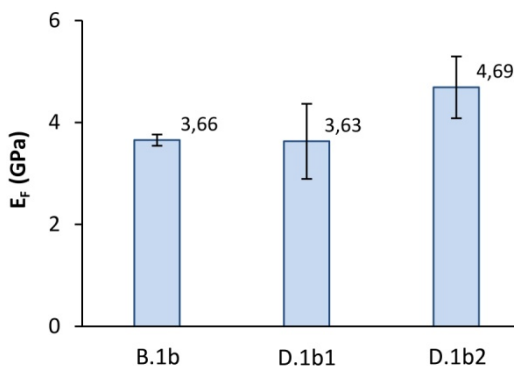


Asimismo, la tensión máxima obtenida con la matriz mixta fibro-reforzada presenta valores 10% menores que las muestras realizadas con matriz de cemento Pórtland en iguales condiciones de curado.

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)

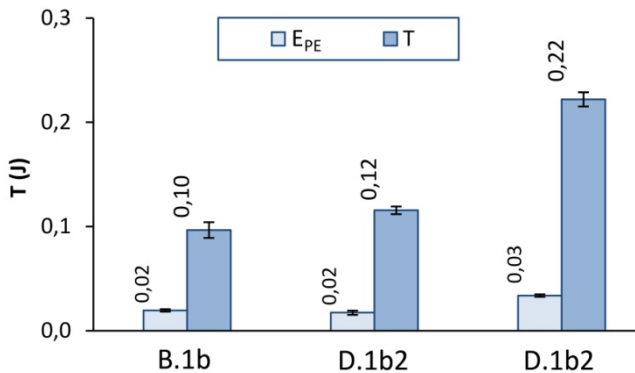


Sin embargo, la exposición durante 28 días a temperatura de 45 °C ha hecho aumentar el módulo elástico a flexión cerca de 30%, transformándose en un material compuesto menos elástico.

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.

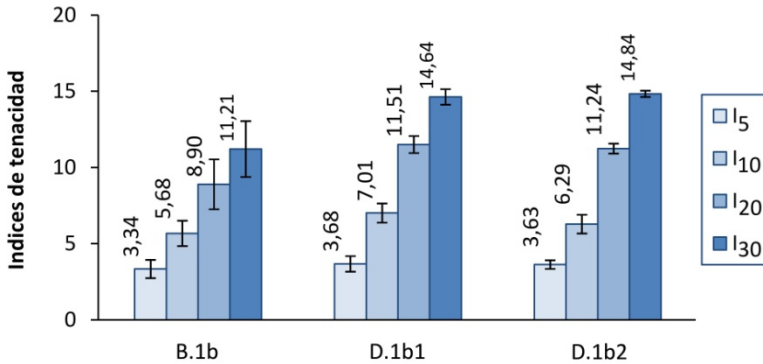
Asimismo se observa que las variaciones respecto a la media son bajas, con coeficientes de variación de 3% para las muestras con matrices mixtas y 8% con matriz de cemento Pórtland.

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