



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

PREPARACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON RESIDUOS DE BOTELLAS DE POLIETILENTEREFTALATO

Alumno: Pascual Ángel Felgueras Mercado

Tutoras: Dña María Dolores la Rubia García y Dña
Dolores Eliche Quesada

Dpto: Ingeniería Química, Ambiental y de los
Materiales

Septiembre, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales

Dña María Dolores La Rubia García y Dña Dolores Eliche Quesada, tutoras del Trabajo Fin de Grado titulado: **Preparación de materiales de construcción con residuos de botellas de polietilentereftalato**, que presenta el alumno D. Pascual Ángel Felgueras Mercado, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2018

El alumno:

D.Pascual Ángel Felgueras Mercado

Las tutoras:

Dña Dolores Eliche Quesada,
Dña María Dolores La Rubia García.

Índice

RESUMEN.	4
ABSTRACT.	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Morteros.....	9
1.2. Introducción al polietilentereftalato (PET).	12
1.3. Introducción al cemento Pórtland.	12
1.3.1. Silicato tricálcico (C_3S).....	13
1.3.2. Silicato dicálcico (C_2S).....	13
1.3.3. Aluminato tricálcico (C_3A)	14
1.3.4. Ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF)	15
1.3.5. La hidratación del cemento Pórtland.....	16
1.4. Antecedentes de fabricación de de morteros con PET.	21
2. OBJETIVOS.....	24
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	25
3.1. Materiales	25
3.1.1. Cemento Pórtland.....	25
3.1.2. Arena.....	27
3.1.3. PET.	27
3.2. Caracterización de las materias primas.....	29
3.2.1. Caracterización del cemento Pórtland.	29
3.2.1.1. Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa.....	29
3.2.1.2. Análisis de difracción de rayos X (DRX).	30
3.2.1.3. Caracterización microestructural.	31
3.2.1.4. Fluorescencia de Rayos X.	32
3.2.1.5. Distribución granulométrica.	32
3.2.1.6. Análisis elemental (CHNS-O).	33
3.2.2. Densidad de la mezcla utilizada.....	34
3.3. Elaboración de probetas de mortero	35
3.3.1. Composición de probetas de mortero	35
3.3.2. Caracterización de las materias primas	36
3.4. Caracterización física y química de los morteros.....	40
3.4.1. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido	40

3.4.2.	Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.....	43
3.4.3.	Determinación de la resistencia a flexión del mortero endurecido.....	46
3.4.4.	Determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido.....	50
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
4.1.	Caracterización de las materias primas.....	55
4.1.1.	Caracterización del Cemento Pórtland.....	55
4.1.1.1.	Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa.....	55
4.1.1.2.	Distribución granulométrica.....	55
4.1.1.3.	Análisis elemental (CHNS-O).....	57
4.1.1.4.	Fluorescencia de rayos X (FRX)	58
4.1.1.5.	Caracterización mineralógica (DRX)	59
4.1.1.6.	Caracterización microestructural (SEM)	59
4.2.	Resultados de la caracterización del PET	61
4.3.	Caracterización física y mecánica de los morteros.....	62
4.3.1.	Densidad aparente de los morteros con PET.....	62
4.3.2.	Absorción de agua por capilaridad de los morteros con PET	65
4.3.3.	Resistencia a flexión de los morteros con PET	67
4.3.4.	Resistencia a compresión de los morteros con PET	69
4.3.5.	Relación de la densidad aparente con la resistencia a flexión de los morteros con PET	71
4.3.6.	Relación de la densidad aparente con la resistencia a compresión de los morteros con PET	74
4.3.7.	Relación resistencia a flexión/resistencia a compresión.....	76
4.4.	Posibles aplicaciones y normativa europea sobre el uso de morteros.....	78
4.4.1.	Prescripción de morteros de revestimiento	80
4.4.2.	Prescripción de morteros monocapa (OC)	81
4.4.3.	Prescripciones para revestimientos continuos: enfoscados	82
4.4.4.	Prescripciones para morteros de juntas	85
4.5.	Estudio económico.....	87
5.	CONCLUSIONES.....	92
	Bibliografía	94
	Índice de tablas.....	100
	Índice de figuras.....	101

RESUMEN.

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como principal objetivo valorar las posibilidades que presentan los residuos de polietilentereftalato (PET) como materia prima en la fabricación de materiales de construcción sostenibles. Para ello, se ha realizado una incorporación de dicho residuo, procedente de botellas de agua utilizadas, en la mezcla de los morteros de cemento Portland en sustitución volumétrica de la arena normalizada. El TFG ha constado de una amplia parte experimental, en la cual se fabricaron morteros en los que se han emplado distintos porcentajes volumétricos entre el 0 % (mortero control) y el 50% (0, 10, 20, 30, 40, 50%) de sustitución del residuo plástico triturado en forma de escamas por arena. Tras la fabricación y el curado de los morteros a tiempos de curado de 7 y 28 días, los morteros se sometieron a ensayos de densidad aparente, absorción de agua por capilaridad, resistencia a flexión y resistencia a compresión.

Los resultados muestran que la densidad aparente de los morteros desciende y la absorción de agua por capilaridad aumenta a medida que incrementa el porcentaje de residuo PET. En relación a la influencia de tiempo de curado, las probetas tras 28 días de curado presentan una densidad aparente ligeramente mayor y un coeficiente de absorción mas reducido, debido a la formación de silicatos de calcio hidratados y una estructura mas compacta. En cuanto a los ensayos mecánicos, la adición de PET, supone un aligeramiento y una merma de las propiedades mecánicas de resistencia, tanto en flexión y compresión. A pesar de ello, se obtienen valores de resistencias suficientes como para formar parte de muchas aplicaciones en albañilería, pudiendo formar parte de bloques de hormigón, revestimientos...etc. Por otra parte, se comprobó que la resistencia a compresión se ve mas afectada por la adición del plástico que la resistencia a flexión.

Con esta sustitución se consiguen unos morteros más ligeros, debido a la naturaleza menos densa del propio plástico, y además se está valorizando un residuo muy contaminante que actualmente es un verdadero problema medioambiental.

Además, con el empleo de PET como materia prima de los morteros se está fabricando materiales de construcción mas sostenibles, evitando gran parte de la

extracción de áridos del medio ambiente, y segundo, se está reutilizando de forma eficiente uno de los plásticos mas usados y desechados en todo el mundo.

Finalmente se realizó un estudio económico, el cual concluye que actualmente la fabricación de morteros de este tipo resulta mas costosa que los morteros tradicionales. Pero esto, no es concluyente, ya que hay otras variables a tener en cuenta a la hora de los costes globales de usar estos morteros.

ABSTRACT.

The purpose of this End-of-Grade Work (TFG) is to assess the possibilities presented by polyethylene terephthalate (PET) waste as a raw material in the manufacture of sustainable building materials. For this, we have made an incorporation of this waste, from water bottles used, changing this plastic volumetrically by standardized sand. The TFG has consisted of a large experimental part, in which mortars were manufactured in which different volumetric percentages were used, between 0% (control mortar) and 50% (0, 10, 20, 30, 40, 50 %) of substitution of waste plastic, crushed in flake form. After the manufacture and curing of the mortars at curing times of 7 and 28 days, the mortars were subjected to tests of bulk density, water absorption by capillarity, resistance to bending and resistance to compression.

The results show that the apparent density of the mortars decreases and the water absorption by capillarity increases as the percentage of PET residue increases. In relation to the influence of curing time, the samples after 28 days of curing have a slightly higher bulk density and a lower absorption coefficient, due to the formation of hydrated calcium silicates and a more compact structure. As for mechanical tests, the addition of PET, supposes a lightening and a reduction of the mechanical properties of resistance, both in flexion and compression. In spite of this, sufficient resistance values are obtained to be part of many applications in masonry, being able to form part of concrete blocks, coatings ... etc. On the other hand, it was found that the resistance to compression is more affected by the addition of plastic than the resistance to bending.

With this substitution lighter mortars are obtained, due to the less dense nature of the plastic itself, and in addition a highly polluting waste is being revalued that is currently a real environmental problem.

In addition, with the use of PET as a raw material for mortars, more sustainable construction materials are being manufactured, avoiding much of the extraction of aggregates from the environment, and secondly, is efficiently reusing one of the most used and discarded plastics in the world.

Finally, an economic study was carried out, which concludes that the manufacture of mortars of this type is more expensive than traditional mortars. But this is not conclusive, since there are other variables to take into account when it comes to the global costs of using these mortars.

1. INTRODUCCIÓN

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la explotación de arena y grava representa el mayor volumen de extracción de materiales sólidos de todo el mundo, siendo, después del agua, las materias primas más consumidas. Con un consumo cada vez mayor, que supera la velocidad de regeneración de las mismas, pues la arena se genera por procesos de erosión, que conllevan largos periodos de tiempo de miles de años. Las consecuencias de la extracción de arena tienen un impacto brutal sobre el medio ambiente, principalmente sobre los ríos, deltas y ecosistemas de la costa. Si la extracción se realiza del fondo marino, se destruyen hábitats y ecosistemas submarinos. Por no hablar de la contaminación producida por la maquinaria en estos lugares. Todos estos procesos influyen y afectan en el turismo, la pesca y la agricultura locales.

Por otro lado, la gran cantidad de residuos plásticos que se generan actualmente y su dificultad para reciclarlos y/o eliminarlos hace que provoquen un gran impacto ambiental y cada vez exista mayor preocupación en cuanto a su eliminación o reducción. La industria de la construcción es un gran aliado en la utilización y reutilización de residuos de diversas índole en la producción de morteros. En este sentido, los plásticos se presentan como los principales residuos a estudiar como materia prima en materiales de construcción. La mayoría de los plásticos que se fabrican a día de hoy, son utilizados en la industria alimentaria y, por tanto, tienen como característica principal la resistencia al ataque microbiano. Ésto los define, en su mayoría, como no biodegradables y es muy difícil su recolección tras su uso, produciendo una invasión en el medio ambiente y un problema importante actualmente dadas las cantidades de plástico generado para el consumo. El polietilentereftalato (PET) es el plástico más usado a nivel mundial en la fabricación de envases y botellas, que son desechados diariamente por millones, tras su uso. El PET puede ser un recurso a tener en cuenta en la fabricación de morteros (QuimiNET, 2003).

1.1. Morteros

De forma general, los morteros son mezclas plásticas de un aglomerante, con un añadido de arena y agua, que suelen ser utilizados para unir ladrillos, piedras o bloques integrantes de una obra de fábrica, forman parte del revestimiento de fachadas, como enlucidos o revocos (UCLM, 2018).

Los morteros se denominan según el tipo de aglomerante, pueden ser morteros de yeso, de cal, de cemento, de arcilla...etc. Dependiendo del aglomerante, el mortero tendrá unas características físicas y mecánicas muy distintas, y por tanto, tendrá distintas aplicaciones (UCLM, 2018).

En el caso del estudio realizado, el aglomerante es el cemento y se distinguen los siguientes tipos de morteros (Tabla 1.1).

Morteros de cemento y arena					
Tipo de mortero	Proporción en volumen		kg de cemento por m ³ de mortero	Empleo preferente	Resistencia (kg/cm ²)
	Cemento	Arena			
Ricos	1	1	800	Bruñidos y revoques impermeables.	160
	1	2	600	Enlucidos, revoque de zócalos, corrido de cornisas.	
	1	3	450	Bóvedas tabicadas, muros muy cargados, enlucidos de pavimento, enfoscados.	
Ordinarios	1	4	380	Bóvedas de escalera, tabiques de rasilla.	130
	1	5	300	Muros cargados, fábrica de ladrillos, enfoscados.	98
Pobres	1	6	250	Fábricas cargadas	75
	1	8	200	Muros sin carga	50
	1	10	170	Rellenos para soldado	30

Tabla 1.1 Tipos de morteros de cemento y arena. Fuente: UCLM., (www.ingenieriarural.com)

Si a esta mezcla de cemento y arena, se le añade grava, al mortero se le llama hormigón que con refuerzos de acero es utilizado para formar las estructuras que soportan la carga en las obras de mayor tamaño, como edificios, puentes..etc.

Dentro de las prestaciones en general que ofrecen los morteros, se deben diferenciar dos etapas. La etapa en la que el mortero se encuentra en estado fresco y la etapa donde tras el fraguado, el mortero se ha endurecido. El estado fresco del mortero se refiere a la fase equivalente tras el mezclado y amasado del mismo. El mortero permanecerá en estado fresco dependiendo de las proporciones de los integrantes de la mezcla, siendo principal para esto los componentes que formen el aglomerante, que determinarán la velocidad de hidratación del cemento o aglomerante. También influye la humedad y temperatura. En esta etapa la mezcla tiene gran trabajabilidad y plasticidad, lo cual es ideal para su puesta y colocación en obra. Tras esta fase, el mortero se endurece debido a las reacciones de hidratación del cemento. Finalmente el mortero se encuentra en estado endurecido, cuyas propiedades son demandadas por el cliente y deben cumplir con las exigencias de la normativa (Construmática, 2018).

En el proceso de fraguado y curado de los morteros, el agua toma un papel fundamental en el proceso de la formación de silicatos de calcio.

Por este motivo, la aportación de agua debe ser controlada, tanto para el amasado como para el curado. Respecto al agua utilizada en la fabricación de los morteros, se debe prestar mas atención a las aguas utilizadas para el curado que para el amasado, debido a que en el amasado la aportación de agua es limitada y se añade en una sola vez, mientras que se tiene una mayor aportación de agua de curado, y las reacciones que pueda provocar van a incidir sobre una masa ya endurecida y podría provocar algun problema de tipo frágil.

El agua de amasado participa en la reacción de hidratación del cemento y da al mortero una trabajabilidad plástica. La cantidad de agua debe ser estricta pues se pueden generar demasiados poros internos si la cantidad supera a la recomendada o un morteros muy poco trabajable al cual le falte agua en la reacción. Por otro lado, el agua de curado es la encargada de evitar la desecación, mejorar la reacción de hidratación del cemento y evitar la retracción prematura (UCML, 2018).

Los morteros también pueden ser clasificados según el concepto de fabricación. El desarrollo de la industria de los morteros y la gran demanda de producción, genera que las empresas fabriquen morteros a la medida del cliente, en lo relativo a las propiedades físicas y mecánicas del mortero y a su composición y proporción de componentes.

Existen los llamados “morteros diseñados” los cuales son morteros cuya composición y método de fabricación son elegidos por el fabricante a fin de obtener unas propiedades demandadas por el cliente y por otro lado, “los morteros de receta o prescritos”, los cuales las composiciones y proporciones son especificadas por el cliente y las cualidades físicas y mecánicas vendrán determinadas por las propias proporciones (Construmática, 2018).

1.2. Introducción al cemento Pórtland.

El cemento es bien sabido uno de los elementos principales en la construcción. Ya que tiene grandes ventajas de resistencia a la compresión, resiste a altas temperaturas, y a la corrosión por sustancias químicas. El mortero no es más que la mezcla de cemento con una porción de arena. Se emplea en muros, siendo la unión entre ladrillos, recubrimientos de paredes, fachadas...etc.

El cemento Pórtland, es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que cuando se amasa con agua forma una pasta que fragua, endurece por reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido mantiene su resistencia y estabilidad incluso en contacto con agua (Álvarez, 2010). Este material fue patentado por J. Aspdin en el año 1824, y llamado así por su semejanza a las rocas caliza de la isla de Pórtland, en Inglaterra (Lahmia, 2010).

Se obtiene por el calentamiento inicial (1400°C aproximadamente) de una mezcla de piedra caliza y arcilla finamente molidas. El calentamiento se realiza en hornos giratorios ligeramente inclinados de 100 m de largo y 3 m de diámetro.

El material obtenido llamado “clínker” se muele finamente añadiéndole de un 2% a 3% de yeso para impedir que fragüe de inmediato .

En cuanto a su composición química, el cemento esta compuesto principalmente por cal, sílice, alúminia y óxidos de hierro. Los compuestos del cemento formado con este procedimiento son los que se muestran en la Tabla 1.2:

Compuesto	Fórmula	Fórmula de óxidos	Abreviatura	Porcentaje (%)
Silicato tricálcico	Ca_3SiO_5	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	40 - 60
Silicato dicálcico	Ca_2SiO_4	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 - 30
Aluminato tricálcico	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	5 - 10
Ferritoaluminato tetracálcico	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5 - 15

Tabla 1.2. Principales compuestos del cemento Pórtland.

1.2.1. Silicato tricálcico (C_3S)

El silicato tricálcico (también abreviado como C_3S o alita) es un silicato cálcico hidratado que se encuentra en los clínters de los cementos Pórtland entre porcentajes del 40% al 60% (Tabla 1.2) (Mingarro, 1985). La fórmula de la “alita” es $3CaO \cdot SiO_2$. Entre sus características mas destacables, tiene una elevada velocidad de hidratación (fraguado y endurecimiento) y una elevada capacidad exotérmica (libera calor en las reacciones de hidratación). De esta manera los cementos con un alto contenido de silicatos tricálcicos se les denominan “cementos calientes”.

Estos cementos obtienen rápidamente sus características mecánicas de resistencia por la elevada velocidad de hidratación. El inconveniente de estos cementos son su gran contenido y generación de cal y los cambios volumétricos debido a las reacciones exotérmicas que generan dilataciones térmicas (Cassinello, 1996).

Por este motivo último, cuando se utilizan grandes cantidades de hormigón de alto contenido de “alita”, suelen aparecer fisuras y grietas en el cuerpo de la mezcla, debido a esos cambios y dilataciones volumétricas producidas por los cambios de temperatura en las reacciones. De esta manera, en las grandes construcciones no se suelen utilizar cementos con alto contenido en silicatos tricálcicos. Por otro lado, los cementos con altos contenido en silicatos tricálcicos son menos estables que los cementos que poseen alto porcentaje de silicatos dicálcicos, como resultado de que la “alita” genera mayor cantidad de cal. La cal es atacada fácilmente por los agentes atmosféricos (Mingarro, 1985).

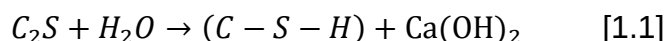
1.2.2. Silicato dicálcico (C_2S)

“El silicato dicálcico (se denomina también Ca_2Si , C_2S o belita en su forma mineral) es un silicato cálcico hidratado que resulta ser un ingrediente típico en los clínters de los cementos Pórtland” (Mingarro, 1985). Encontrándose en porcentajes de entre 15 y 30% (Tabla 1.2). La fórmula de la “belita” es $2CaO \cdot SiO_2$. Entre sus características mas destacables, genera una velocidad de hidratación (fraguado y endurecimiento) más lenta que la del silicato tricálcico. Si se comparan las velocidades de fraguado entre los componentes, el silicato tricálcico tiene una velocidad de hidratación 10 veces superior a la del silicato dicálcico.

Por este motivo, los cementos con alto porcentaje de contenido de “belita” se les consideran “cementos fríos” debido a sus reacciones menos exotérmicas y a su lento endurecimiento en el proceso de hidratación (Mingarro, 1985).

“El nombre de belita se debe a Törneborn que en 1897 identificó el cristal al visualizar en un microscópico los cristales de un cemento Pórtland” (Bournazel et al., 1998). El nombre de “belita” es comúnmente usado en la industria del cemento, pero aún así, no es reconocido como el nombre del propio mineral.

En cuanto a la reacción química, la belita (C_2S) reacciona con el agua, produciendo en la reacción de hidratación portlandita ($Ca(OH)_2$) y un gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H).



Debido a la reacción poco exotérmica, y en consecuencia, un lento hidratado y fraguado de los morteros con alto contenido en silicatos dicálcicos, éstos son adecuados en hormigones requeridos para altas prestaciones mecánicas a medio y largo plazo.

1.2.3. Aluminato tricálcico (C_3A)

El aluminato tricálcico (se denomina también como C_3A o celita). La fórmula de la celita es $Al_2O_3 \cdot 3CaO$. Es otro de los compuestos químicos existentes en el clínker de los cementos Pórtland (de 5% a 10%) (Tabla 1.2). *“Reacciona muy rápidamente con el agua, es el que posee una cinética reactiva de mayor velocidad entre los componentes silicatos del clínker” (Duda, 1977). Esta velocidad en la reacción de hidratado forma, en apenas unos minutos, el crecimiento de cristales de aluminato, los cuales generan una resistencia muy rápidamente en el cemento del hormigón.*

“Los cristales de aluminato tienen estructura cúbica con $a = 1.5263 \text{ nm}$. Cuando se presenta puro la proporción es 62,3% de CaO , 37,7 % de Al_2O_3 . La velocidad de hidratación es muy superior a la de los silicatos del clínker del cemento (C_3S y C_2S). Esta capacidad se pierde en presencia de iones de sodio, formándose hidratos de estructura hexagonal. Los cementos y hormigones que superan un 10% de aluminato

tricálcico son poco adecuados para los ambientes marinos (se suele añadir cemento puzolánico)” (Páez, 1986).

“Para el estudio del comportamiento del cemento Pórtland tiene una importancia fundamental el conocimiento de la hidratación del aluminato tricálcico, por ser uno de sus componentes que primero se hidrata y porque se le achacan la mayoría de los defectos que sufre la pasta de cemento; tales como las retracciones, contracciones, fenómenos exotérmicos y sensibilidad a agentes exteriores de tipo químico” (Triviño, 1974).

1.2.4. Ferritoaluminato tetracálcico (C₄AF)

El ferritoaluminato tetracálcico (se denomina también C₄AF o felita) es un compuesto complejo contenido en el clinker de los cementos Pórtland entre porcentajes de 5% a un 10% (Tabla 1.2). La fórmula de la “felita” es $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. *“Se caracteriza por aportar escasa o nula propiedad física de resistencia al hormigón al ser hidratado en la fragua del cemento” (Mingarro, 1985).*

El ferroaluminato tetracalcico (C₄AF o felita) es un compuesto que comparte ciertas propiedades semejantes al aluminato cálcico, pues la reacción de hidratado es muy rápida y desarrolla resistencias bajas. Durante el proceso de hidratación, las reacciones son de tipo exotérmico, produciendo calor. Al igual que ocurre con los cementos con alto porcentaje en silicatos tricálcicos, cuando se utilizan grandes masas de hormigón con estos compuestos, las reacciones exotérmicas generan problemas de calor. Si las secciones de hormigón son pequeñas, el calor puede disiparse, pero si el volumen de hormigón es considerable, el calor no puede disiparse con facilidad, siendo esto un inconveniente a tener en cuenta pues se han observado reacciones de hidratación alcanzando hasta los 50 °C. Teniendo en cuenta que la temperatura ambiente normalmente va a ser menor, se producen saltos térmicos, ocasionandose contracciones térmicas que originan fisuras, grietas y posiblemente, el defecto pueda llevar a la falla del hormigón. De este modo es muy importante el control de este efecto, usando un cemento con un bajo calor de hidratación y/o puzolanas. Las puzolanas son añadidas al cemento, para formar un cemento puzolánico, para controlar el calor de en las reacciones. Por eso es muy comunmente usado en coladas de grandes dimensiones. El calor de hidratación del cemento se mide en calorías por

gramo. Cuanto menor sea el calor de hidratación, menor será la temperatura a que se eleve el cemento (Abanto, 1997).

1.2.5. La hidratación del cemento Pórtland.

El cemento es un conglomerante hidráulico e inorgánico, y cuando se mezcla con agua forman una pasta, la cual fragua y se endurece debido a las reacciones químicas y a su proceso de hidratación. El agua, aunque está mezclada con el cemento, se puede encontrar de tres formas dentro de él. La que está químicamente combinada, es decir la que cambia de composición molecular. Otra es el agua que se encuentra en los poros del hormigón y lo que resta del agua es la que realiza el proceso de hidratación con los compuestos, es decir es el agua del gel o el agua absorbida (IECA, sf).

Los nuevos compuestos formados por las reacciones químicas son:

- Silicato tricálcico + agua → gel de tobermorita + hidróxido de calcio [1.2]
- Silicato dicálcico + agua → gel de tobermorita + hidróxido de calcio [1.3]
- Ferroaluminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio → hidrato de calcio [1.4]
- Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de calcio → hidrato de Aluminato [1.5]
- Tricálcico Aluminato tricálcico + agua + yeso → sulfoaluminatos de calcio [1.6]

Las dos primeras reacciones [1.2] y [1.3] son aproximadamente el 75% del peso del cemento los cuales reaccionan con el agua y producen el gel de tobermorita (50%) y el hidróxido de calcio (25%),

Las reacciones [1.4] y [1.5] son aquellas que se combinan a los compuestos principales para formar nuevos productos. La última reacción [1.6], donde se agrega el yeso, controla el fraguado del hormigón debido a éste componente.

Cada producto de las reacciones obtenidas cumple una función en el comportamiento mecánico del mortero endurecido. Los productos de la reacción se presentan como masas densas de porosidad característica, que reciben la denominación de “gel de cemento” por su homología con las sustancias coloidales. La fracción de pasta que no está ocupada por “gel de cemento” se denomina “espacio

capilar”. Establecidos dichos términos, puede considerarse que la pasta de cemento es un material multifase, compuesto por partículas de cemento sin hidratar embebidas en una matriz continua de “gel de cemento”, atravesada por poros de gel y poros capilares, ocupados por agua. En el interior del “gel de cemento” se encuentran los denominados “poros del gel” de tamaño inferior a los “poros capilares” (Pantigoso et al., 2015).

La velocidad de hidratación de los componentes del cemento causa el aumento de la temperatura, y ésta se retarda si la temperatura disminuye. De acuerdo a los componentes de cualquier tipo de cemento la hidratación y por ende la resistencia se puede obtener a edades tempranas o tardías. Dado esto, se emplean o disminuye las puzolanas según sea el requerimiento de obra.

Ésta, además, es afectada por la composición y la finura del cemento, de la cantidad de agua agregada y la temperatura de los agregados al mezclarlos.

A continuación se dan los valores para la cantidad total de calor desprendido durante la hidratación completa del cemento:

Silicato tricálcico	120 cal/g	Ferroaluminato tetracálcico	100 cal/g
Silicato dicálcico	62 cal/g	Cal Libre	279 cal/g
Aluminato tricálcico	207 cal/g		

Si se considera que la cantidad de calor generada durante los primeros 7 días de hidratación para el cemento del Tipo I es el 100%, entonces:

Tipo I (CEM I), moderadamente resistente al sulfato	85-94%
Tipo II (CEM II), calor moderado de hidratación	75-85%
Tipo III (CEM III), alta resistencia temprana	150%
Tipo IV (CEM IV), bajo calor de hidratación	40-60%
Tipo V (CEM V), resistente al sulfato	60-90%

1.3. Introducción al polietilentereftalato (PET)

EL polietilentereftalato (PET) es un plástico perteneciente a la familia de los poliésteres, de tipo aromático. Por su condición de termoplástico es posible su reciclaje. Fue descubierto por los científicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras, dada la necesidad de un sustituto para el algodón. En 1946 ya estaba industrializado para su producción en fibras de uso textil. Mas tarde se empezó a comercializar como film para envase de alimentos, aunque la principal función en la actualidad es como envase rígido para el embotellado de bebidas, especialmente las carbonatadas.

La producción del PET, como cualquier plástico, se realiza en plantas petroquímicas, donde los polímeros son obtenidos por refinación y reformación del petróleo crudo.

Para la fabricación del PET, es primordial el uso del xileno (dimetilbenceno), un importante químico industrial utilizado para la fabricación de tintas y ácidos, como el ácido tereftalático puro (PTA). Los xilenos se encuentran en los gases de coque, los gases producidos en la destilación de madera seca y en algunos petróleos (Benkler, 2012).

El xileno es usado en la reacción de polimerización, produciendo una larga familia de poliésteres. La reacción comienza con la separación de los isómeros del xileno. El primer paso es recuperar el para-xileno (el xileno tiene tres isómeros, orto, meta y para-xileno) a través de los distintos puntos de ebullición de los isómeros. En la Tabla 1.3, se recogen algunas características importantes de los distintos tipos de xileno.

	ORTO	META	PARA
Punto de ebullición	144°C	139,3 °C	137-138 °C
Punto de solidificación	-25 °C	-47,4 °C	13-14 °C

Tabla 1.3. Características de los tipos de xilenos.

Una vez obtenido el para-xileno del petróleo crudo, el otro compuesto necesario es el etileno, el cual se obtiene por refinamiento del petróleo crudo. El etileno es tratado con oxígeno con plata como catalizador, para producir óxido de etileno, el cual reacciona con el agua para producir etilenglicol, un monómero necesario posteriormente para la producción del PET.

El siguiente paso consiste en la oxidación y esterificación del para-xileno para la obtención del anteriormente nombrado ácido tereftálico (TPA) y tereftalato de dimetilo (DMT) respectivamente. Haciendo reaccionar por esterificación TPA o DMT con etilenglicol (obtenido anteriormente del etileno) se obtiene un monómero, el cual, mediante policondensación, se polimeriza en PET (Mariano, 2011).

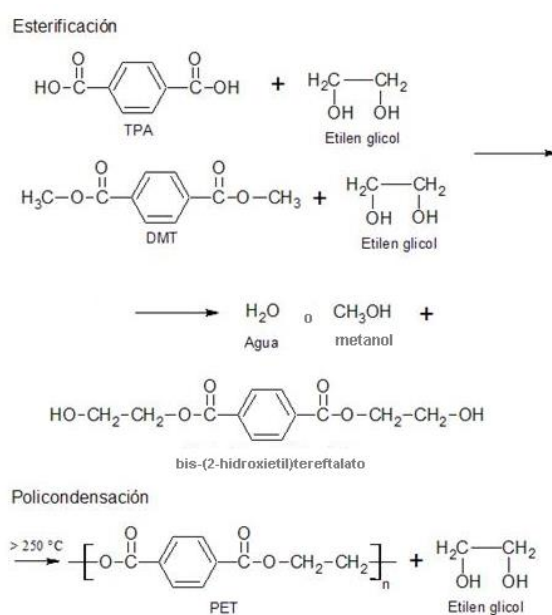


Figura 1.1. Esquema de esterificación y policondensación del PET.

Tras el proceso de policondensación, cuando la masa del polímero alcanza la viscosidad deseada, se introduce nitrógeno en el reactor (lugar donde se lleva a cabo la policondensación), en el momento en el cual se detiene la reacción. El nitrógeno evita cualquier proceso de oxidación y empuja por presión a la masa a pasar por una matriz que forma hilos del polímero. Estos hilos se enfrían y solidifican al pasar por una batea con agua. Tras este proceso, una cortadora (peletizadora), los transforma

en pellets, listos y almacenados para la posterior conformación en distintos procesos de fabricación industrial, ya sea inyección, extrusión, moldeado, soplado...etc.

El PET puede ser sometido a un proceso de cristalización, el cual genera un aumento de la densidad del mismo, pasando aproximadamente de $1,33 \text{ g/cm}^3$ en estado amorfo a $1,4 \text{ g/cm}^3$ en estado cristalino. La cristalización es un proceso que consiste en la transformación de la estructura del polímero, pasando de un estado amorfo a un estado cristalino. El proceso industrial consiste en un tratamiento térmico a $130\text{-}160 \text{ }^\circ\text{C}$, en un tiempo que puede oscilar entre 10 minutos y una hora. Para evitar la fusión y la unión entre los pellets, éstos se encuentran en agitación mecánica constante o sumergidos en un fluido.

Otro proceso al que puede ser sometido el PET, es el de polimerización en estado sólido o post-polimerización. El proceso industrial consiste en introducir el polímero sólido en el reactor, para someterlo a una temperatura entorno a los $200 \text{ }^\circ\text{C}$ y a un flujo de gas inerte. Este tratamiento tiene como objetivo aumentar el peso molecular del polímero. De estos reactores se obtiene el PET con una elevada cristalinidad y una viscosidad (relacionada directamente con el peso molecular) apta para la fabricación de botellas (Mariano, 2011).

Entre las propiedades químicas del PET cabe destacar:

- Elevada pureza.
- Buena resistencia química (a aceites y grasas presentes en alimentos, ácidos minerales, sales, jabones, hidrocarburos, alcoholes...etc.) y térmica.
- Muy buena barrera del CO_2 y aceptable contra el O_2 . Utilizado junto con otros materiales para mejorar la capacidad de barrera
- Reciclable, por su termoformabilidad. Es el N°1 en material reciclado.
- Biorientación (Mejora de propiedades mecánicas y de barrera)
- Cristalizable y esterilizable mediante rayos gamma y óxido de etileno. Está aceptado su uso en contacto con productos alimentarios.
- Excelentes propiedades mecánicas: Alta resistencia y tenacidad.
- Alta resistencia al desgaste y buen coeficiente de deslizamiento.

- Apto para los procesos de soplado, calado, inyección y extrusión, por tanto, apto para producir botellas, películas, láminas y diferentes piezas.
- Capacidad de transparencia, aceptando colorantes y brillos.

En relación a las aplicaciones el PET en la actualidad, cabe destacar: el envasado y empaquetado gracias a su capacidad de impermeabilidad, tanto a gases como a líquidos. Hoy en día el PET forma parte casi por completo de todas las botellas fabricadas para contener bebidas carbonatas y la mayoría de las no carbonatadas.

El uso eléctrico o electrónico también es un sector adecuado para el uso del PET. Gracias a la resistencia dieléctrica y mecánica, el PET puede ser usado como aislante. Por otra parte, al pertenecer a la familia del poliéster, también tiene hueco en la industria textil.

1.4. Antecedentes de fabricación de morteros con PET.

Se han revisado estudios anteriores a éste para valorar de forma anticipada y comparar, contrastar resultados obtenidos y obtener una experiencia o referencia.

Un trabajo realizado en la Universidad Mayor de Bolivia (Flores *et al.*, 2014) fue realizado con la finalidad de utilizar estos desechos de PET procedentes de envases descartables y otros residuos para la fabricación de morteros de elementos constructivos. Los residuos se trituraron e incorporaron a una mezcla de cemento con un aditivo químico, para mejorar la resistencia. Con esa mezcla se fabricaron ladrillos y tejas para las cuales se presentó un menor peso unitario y una absorción aceptable. Los resultados obtenidos fueron que los elementos constructivos tenían la calidad técnica suficiente para su aplicación. Se obtenían resistencias menores que con los materiales tradicionales, pero suficiente para ciertas aplicaciones. Otra conclusión es relacionada con el coste. El coste de un ladrillo de PET era un 30% mayor que el de un ladrillo convencional. Pero se verificaba un ahorro en la construcción de cerramientos con espesores de menor tamaño debido a la buena aislación térmica que aporta el plástico. Finalmente, se presentó como problema la poca docilidad y homogeneidad de la mezcla, que provocaba una disminución del asentamiento (después del compactado), debido, a juicio de los autores, por la inadecuada granulometría de las escamas aportadas de PET.

La Universidad de La Salle realizó en 2015 un estudio (Zúñiga, 2015) el cual evaluó la posibilidad de aprovechar el PET reciclado como un material de agregado en las mezclas de mortero y hormigón para su aprovechamiento y disminución de impactos ambientales a los cuerpos de agua, suelo, aire y salud pública, generados por la inadecuada disposición final del PET. La evaluación se realizó mediante ensayos de laboratorio, pruebas mecánicas de resistencia y otras como pruebas de permeabilidad y absorción, desarrolladas para 16 morteros en los cuales se sustituyó hasta el 15% de los áridos por PET reciclado. De acuerdo a los resultados que se obtuvieron en las pruebas mecánicas se concluyó que el porcentaje óptimo de sustitución que asegura un comportamiento mecánico óptimo es del 6%. Aunque va más allá, asegura que una sustitución del 15% es óptima en cuanto al mayor aporte de PET y mantenimiento de las propiedades mecánicas sin verse mermadas.

Otro estudio realizado por el Instituto de Tecnología Arquitectónica de Argentina (ITA) en 1997 (Magariños et al., 1997) desarrolló la hipótesis de utilizar los desechos post-industriales de PET como sustituto de áridos, ingredientes de morteros, en la fabricación de componentes constructivos. En dicho estudio se valoran las distintas propiedades físico-químicas de distintos morteros en los que se reemplazó el contenido de árido por escamas de PET en distintas proporciones. Se compararon y evaluaron las propiedades mecánicas de los morteros en estudios mediante ensayos de resistencia a flexión, compresión, absorción, durabilidad...etc. Las conclusiones obtenidas fueron que una sustitución del 66% por áridos era la mas recomendable. Esto era debido a que respondía a la exigencia de las normas IRAM 11561 para bloques, con respecto a la absorción, resistencia a rotura por compresión, logrando además facilitar la mano de obra al reducir un 35% de peso unitario del mortero. Otras ventajas son el ahorro de materia prima que prolonga la explotación de canteras naturales. En cuanto a las ventajas presentadas, las mas comunes son de tipo económico y ecológico, ya sea por el menor gasto de combustible en el transporte, o la utilización de residuos desechados que provocan impacto ambiental.

Comparando los tres estudios anteriores, se observa que un estudio da un porcentaje óptimo del 66%, otro del 15% (porcentaje límite usado, no excluyendo así la posibilidad de un porcentaje óptimo mayor del 15%) y otro el cual asegura que el comportamiento mecánico se ve mermado, pero es suficiente como para ser utilizado

en aplicaciones con un ahorro sustancial de mano de obra y material. Los tres estudios convergen claramente en la parte económica y ecológica, la cual es positiva en todos los sentidos. Reducción de residuos e impacto ambiental y ahorro en la mano de obra y en materiales, a grandes rasgos.

2. OBJETIVOS.

La utilización de residuos de plásticos generados en distintas industrias, como sustitutivo de la arena en los morteros para albañilería, tiene un doble efecto beneficioso para la preservación del medio ambiente. Por un lado, se reciclan unos desechos que generalmente acaban en vertederos y por otro, se disminuye el consumo de áridos que se extraen de la naturaleza.

Los morteros y hormigones de peso ligero pueden ser producidos mediante la sustitución de áridos ligeros tradicionales por agregados poliméricos ligeros, ya sea parcial o totalmente dependiendo de los requisitos de densidad y resistencia, con el fin de reducir el problema de eliminación de residuos sólidos, la contaminación del medio ambiente y el consumo de energía.

EL objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) es la obtención de morteros de cemento para albañilería con sustitución parcial de la arena por residuos plásticos. Se propone usar residuos de botellas de plástico fabricadas de polietilentereftalato (PET). Se caracterizarán los morteros aligerados evaluando las proporciones mas adecuadas que no disminuyan considerablemente las propiedades mecánicas del mortero y que, por otro lado, aumente su capacidad aislante.

En primer lugar se fabricarán los morteros, sustituyendo el residuo PET por áridos en porcentaje volumétrico del 10, 20, 30, 40 y 50 %. A su vez, para cada porcentaje se realizarán probetas que se curarán a dos tiempos, 7 y 28 días.. Por tanto, se fabricarán 10 muestras diferentes de morteros, las cuales se someterán a ensayos de densidad aparente, resistencia a flexión, absorción de agua por capilaridad y resistencia a compresión para determinar sus propiedades físicas y mecánicas en función del % de PET adicionado y del tiempo de curado.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Materiales

3.1.1. Cemento Pórtland.

Para la realización del estudio de los morteros, se ha utilizado Cemento Pórtland de alta resistencia CEM II / A-V 42,5 R de la firma Holcim. En la Tabla 3.1, se recogen las principales características del cemento y en la Tabla 3.2 las especificaciones técnicas.

Holcim		CEM II/A-V 42,5 R
Comportamiento del Hormigón en fresco	Demanda de agua	+
	Trabajabilidad / plasticidad	++
	Exudación / Segregación	+
	Fraguado / Endurecimiento	+
Comportamiento del Hormigón endurecido	Color Claro	—
	Resistencias a compresión a 1 día	+
	Resistencias a compresión a 7 días	+
	Resistencias a compresión a 28 días	+
	Resistencias a compresión a 60 días	+
	Resistencias a tracción	+
	Módulo de elasticidad	+
Durabilidad	Permeabilidad al agua	+
	Resistencia a los cloruros	+
	Resistencia a los sulfatos y agua de mar	+
	Resistencia a ciclos de hielo-deshielo	+
	Resistencia reactividad árido-álcalis	0
Efectos diferidos	Calor de hidratación	+
	Retracción	+
	Fluencia	+
Sostenibilidad	Menor consumo de recursos naturales	+
	Menores Emisiones de CO ₂	+

— Desfavorable, 0 neutro, + favorable, ++ muy favorable

MATERIAS PRIMAS NATURALES	MATERIAS PRIMAS RECICLADAS
MINERAL DE YESO Y ANHIDRITA	ADITIVOS
ARCILLAS	BARROS CARBONATO
ARENA	BORRA
ARENISCA	CASCARILLA HIERRO
BAUXITA	CENIZAS
CALIZA	ESCOBRO
CAOLIN Y ARCILLAS CAOLINICAS	ESCORIAS
CRETA	ESPUMA AZUC.
CUARZO	ESTERILES
FILLER CALIZO	POLVO DE MARMOL
HIERRO	POLVO RESIDUO
KIESELGURH	PURPURA
LIMONITA	RECHAZO
MARGA	SULFATO FERROSO
OTRAS SUSTANCIAS ARCILLOSAS	YESO ARTIFICIAL
PIRITAS	OTRAS
PIZARRAS	
PUZOLANAS	
SERICITA	
SILICE	
TOTAL	

Tabla 3.1. Especificaciones del cemento Pórtland CEM II. Fuente: Folleto Supercem de Cemento Pórtland, CEM II

En la Figura 3.1, se muestra el desarrollo de resistencias del cemento con el tiempo decurado.

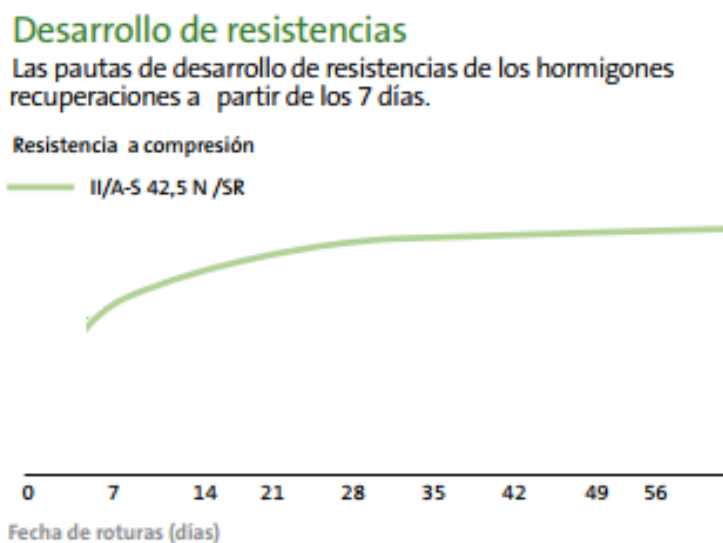


Figura 3.1. Desarrollo de resistencias en el cemento con los días.

Ficha cemento: CEM II/A-V 42,5 R

UNE-EN 1971.

Componentes principales normalizados

Clínker (K)	80-94 %
Cenizas volantes silíceas (V)	6-20 %
Componentes minoritarios	0-5 %

Especificaciones del cemento normalizado

Cloruros	$\leq 0,10 \%$
Sulfatos	$\leq 4 \%$
Inicio Fraguado	$\geq 60 \text{ min.}$
Final Fraguado	$\leq 720 \text{ min.}$
Expansión	$\leq 10 \text{ mm}$
Resistencia a 2 días	$\geq 20 \text{ MPa}$
Resistencia a 28 días	$42,5 \leq R \leq 62,5 \text{ MPa}$

Tabla 3.2. Especificaciones del cemento Pórtland.

3.1.2. Arena.

Para la elaboración de las probetas de mortero con residuos de PET se ha utilizado arena normalizada CEN para ensayos de cementos suministrada por el Instituto Torroja (Figura 3.2.). Los áridos utilizados en la elaboración de las probetas de este TFG están sujetos a la normativa DIN EN 196-1:2016 (DIN EN 196-1, 2016).



Figura 3.2. Arena normalizada CEN-NORMSAND.

3.1.3. PET.

En la elaboración de probetas de mortero se ha utilizado tereftalato de polietileno (PET) reciclados como sustituto de áridos. El PET triturado es procedente del desecho de botellas de agua mineral.

Las botellas se trituraron en un molino de cuchillas que proporciona el material en forma de granza. El equipo específico utilizado para el picado ha sido el molino WSGM-250 (Figura 3.3.) (J Purchades, España) situado en las instalaciones del Centro Tecnológico del Plástico en Martos (Jaén). Consiste en un molino de cuchillas de acero inoxidable diseñado para el picado de materiales plásticos con el objetivo de obtener el material en un formato final con un tamaño de partícula adecuado que permita su transformación posterior en una máquina de inyección, extrusión, etc. El equipo consta de un juego de cribas para controlar el tamaño máximo de los pellets de material que salen del equipo. Presenta una boca de 250 mmx 200 mm, 2 cuchillas fijas, 12 cuchillas móviles y un diámetro mínimo de criba de 8 mm. En la Figura 3.4, se puede observar el PET triturado.



Figura 3.3. Molino de cuchillas WSGM-250



Figura 3.4. PET triturado en forma de escamas.

3.2. Caracterización de las materias primas

3.2.1. Caracterización del cemento Pórtland.

3.2.1.1. Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa.

Para la determinación del contenido en humedad y materia orgánica se ha seguido la norma ASTM D-2974: 1987 (ASTM D-2974, 1987). Para la determinación de la humedad, las muestras fueron introducidas en cápsula de porcelana con un peso conocido, secadas en estufa a 105°C durante 24 horas hasta obtener una masa constante. El valor de la humedad se expresó como porcentaje:

$$\%humedad = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad [3.1]$$

Donde m_i representa la masa inicial de la muestra y m_f la masa final.

La determinación del contenido en materia orgánica se obtiene por ignición de la muestra desecada a 440 °C. La sustancia resultante después de la ignición son las cenizas.

$$\%materia\ orgánica = (m_i - m_f) \cdot 100 \quad [3.2]$$

La medida del pH del cemento Pórtland se obtuvo por medio de un pH-metro de sólidos PCE-PH20S de la marca "PCE Instrument" (Figura 3.5). La determinación del contenido en carbonatos del cemento Portland se realizó por medio de la calcimetría de Bernard. Para ello, se mezcló carbonato cálcico (CaCO_3) con ácido clorhídrico (HCl) desprendiendo CO_2 y se mide la cantidad emitida de gas de acuerdo a la siguiente reacción:

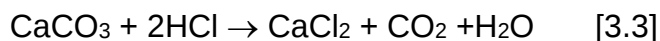




Figura 3.5. pH-metro de sólidos PCE-PH20S, “PCE Instrument”

Para la determinación de la superficie específica del cemento se ha utilizado el método de Blaine (Cebrian, 1971). Esta determinación de la superficie específica se realizó una vez obtenida la densidad relativa mediante el frasco volumétrico de LeChatelier de acuerdo con la siguiente formula:

$$S = \frac{524,17 \cdot 2,66 \sqrt{t}}{\rho} \quad [3.4]$$

Donde S es la superficie específica (cm²/g), t es el tiempo (s) obtenido en el ensayo de Blaine y ρ la densidad en (g/cm³).

3.2.1.2. Análisis de difracción de rayos X (DRX).

Esta técnica se basa en la interacción de los rayos X con la materia para dar lugar a un haz de rayos X difractado. Gracias a esta técnica se pueden distinguir las distintas fases cristalinas o semicristalinas que puede contener un determinado material. Es una técnica muy útil para poder analizar los distintos componentes que forman cada fase.

La difracción de un cristal depende de varios factores:

d = distancia entre planos

λ = longitud de onda de rayos X empleados

n = número entero

θ = ángulo entre el plano y el rayo.

En 1913 William Henry Bragg y su hijo William Lawrence Bragg mostraron la manera de comprender y predecir la difracción debida a la distancia entre planos:

$$d = \frac{n \cdot \lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad [3.5]$$

Existe otro método de estudio con rayos X que obtiene de maneras más eficiente los efectos de la difracción de rayos X a través de la red recíproca. La red recíproca se constituye de puntos definidos por longitudes proporcionales a $\lambda/dhkl$. Estas longitudes provienen de las líneas proyectadas desde un punto ubicado en el cristal (Taylor et al., 2000). Los índices de la red recíproca son los mismos que los del plano que lo derivan y los ejes de la celda unitaria recíproca son a^* , b^* y c^* , perpendiculares a (100), (010) y (001).

Las fases cristalinas fueron evaluadas en un difractómetro automatizado de rayos X X'Pert Pro MPD (PANalytical) equipado con monocromador primario de Ge (111), usando la radiación Cu K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) monocromática y el detector de rayos X. La identificación de las fases cristalinas se llevó a cabo mediante el software High Score Plus de PANalytical (utilizando la base de datos COD_201).

3.2.1.3. Caracterización microestructural.

Para caracterizar la microestructura del cemento Pórtland se ha utilizado la microscopía electrónica de barrido. Con ello podemos estudiar con detalle la topografía de la superficie y la morfología estructural de materiales sólidos. La técnica permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra en estudio utilizando interacciones electrón-materia. Con la utilización del método interactivo electrón-materia junto con el contraste topográfico y profundidad del foco, se llega a obtener imágenes con apariencia tridimensional.

Esta técnica se realizó empleando microscopio electrónico de barrido de alta resolución JEOL SM 840, junto con una espectroscopia de energía dispersiva de Rayos X (SEM/EDX).

3.2.1.4. Fluorescencia de Rayos X.

El estudio de la composición química del cemento Pórtland se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX). Esta técnica consiste en excitar la muestra con una fuente emisora con rayos X. La radiación que incide en la muestra, hace expulsar electrones de las capas interiores del átomo y los electrones de capas exteriores ocupan las vacantes de los electrones. Cuando ocurre un exceso energético puntual se suele disipar en fotones.

Para la realización de esta técnica se ha usado el equipo Philips Magix Pro (PW-2440), (Figura 3.6), con espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva con generador de rayos X.



Figura 3.6. Espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva y generación de rayos X.

3.2.1.5. Distribución granulométrica.

Para el estudio de la distribución granulométrica del cemento Pórtland se utilizó un equipo Malvern-Mastersizer 2.000 (Figura 3.7). Dicho equipo se encarga de analizar la distribución granulométrica de cualquier material sólido disperso en medio líquido. El equipo presenta un rango correcto de análisis de entre 0,02 y 1.500 micras, y lo realiza mediante la tecnología de Difracción de luz Láser.



Figura 3.7. Analizador de granulometría Malvern-Mastersizer 2.000

3.2.1.6. Análisis elemental (CHNS-O).

El análisis elemental consiste en determinar el contenido en carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno que presentan las muestras a analizar. Para la determinación de este contenido se realiza una combustión de las muestras a 950°C en una atmósfera de O₂, usando un analizador elemental. Los gases resultantes de la combustión se transportan a través de un conducto o tubo de reducción, donde se separan por medio de una columna cromatografía y son detectados por el detector de conductividad térmica (T.C.D.). Este detector transmite una señal de salida que es proporcional a la concentración de los componentes que se estudian.

Este análisis elemental se ha realizado con el analizador elemental CHNS-O ThermoFinnigan Flash EA 1112 (Figura 3.8).



Figura 3.8. Analizador elemental CHNS-O ThermoFinnigan Flash EA 1112.

3.2.2. Densidad del PET

La densidad del PET ha sido utilizada para determinar la sustitución y medición de las distintas cantidades necesitadas para la fabricación de las probetas. La variación del porcentaje en volumen de PET por arena implica que la masa aportada de PET vaya variando lógicamente. El PET proporcionado por la trituradora de Andaltec era de una granulometría similar, pero obliga a calcular una densidad experimental del plástico triturado.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [3.5]$$

$\rho \rightarrow$ Densidad (g/ml)

$V \rightarrow$ Volumen medido (ml)

$m \rightarrow$ Masa obtenida (g)

Para el cálculo de la densidad del PET, se utilizó una probeta en la cual se vertieron 50 ml de PET bien presionado, el cual dio una masa de 18.7 g de media (ya que el proceso se repitió varias veces para obtener un valor más fiable).

3.3. Elaboración de probetas de mortero

3.3.1. Composición de probetas de mortero

La composición de las probetas de mortero elaboradas para la realización del TFG consiste en una sustitución de PET (reciclado y triturado) por arena. La sustitución se ha realizado en porcentaje volumétrico, manteniendo a su vez fijas las cantidades de agua y de cemento Pórtland respecto a lo indicado por la normativa de fabricación de morteros.

El peso en gramos que se requiere de cada material para la elaboración de una probeta de mortero de 40x40x160mm, calculada según prescribe la norma EN 196-1:2005 (EN 196-1, 2005) es de 450 ± 2 g de cemento, 1350 ± 5 g de arena y 225 ± 1 g de agua.

Para cada composición se han fabricado dos muestras, con una curación de 7 y 28 días, siguiendo como para la preparación, amasado y curado la referencia de la Norma Española UNE 80-101-88 (Norma Europea EN 196-1, 2005).

La sustitución de PET por arena es de la siguiente forma:

Probeta de 0%: 100% de arena y 0% de PET

Probeta de 10%: 90% de arena y 10% de PET

Probeta de 20%: 80% de arena y 20% de PET

Probeta de 30%: 70% de arena y 30% de PET

Probeta de 40%: 60% de arena y 40% de PET

Probeta de 50%: 50% de arena y 50% de PET

Teniendo siempre en cuenta que es una sustitución en porcentaje de volumen de los 1350 ± 5 g de arena.

La Tabla 3.3 recoge las cantidades con las cuales se prepararon y fabricaron los morteros:

Composición de las probetas							
Porcentaje de sustitución	Arena		PET		Cemento Pórtland (g)	Agua (g)	
	Volumen (ml)	Masa (g)	Volumen (ml)	Masa (g)	450 ± 2	225 ± 1	
	0%	780	1350	0			0
	10%	702	1215	78			29,17
	20%	624	1080	156			58,34
	30%	546	945	234			87,52
	40%	468	810	312			116,69
	50%	390	675	390			145,86

Tabla 3.3. Composición de las probetas

3.3.2. Fabricación de las probetas de mortero

La preparación para la fabricación del mortero, el amasado y el curado se hace siguiendo la norma UNE-EN 196-1:2005 (UNE-EN 196-1, 2005).

En primer lugar, los moldes utilizados son de acero. Constituidos por una base con un tornillo que presiona dos paredes frontales y 4 pletinas encajadas y ensambladas de forma perpendicular a éstas. El molde tiene tres compartimentos de 40x40x160mm que se llenan con exactitud con la mezcla hecha en cada amasada. Cada amasada corresponde a un porcentaje de sustitución de PET, y se realizan dos mezclas por porcentaje, como se señaló anteriormente, una para 7 días y otra para 28 días de curado.

Se utilizarán también probetas para mediciones de volúmenes y balanza de precisión para pesar masas y cantidades de los distintos componentes, además de una mezcladora planetaria Proeti (Figura 3.9.) y distintas herramientas para ayudar en el proceso de moldeado en general.



Figura 3.9. Mezcladora planetaria Proeti.

El procedimiento para la elaboración de las probetas es el siguiente:

- 1- Se realiza el peso de cada material en una balanza de precisión, teniendo en cuenta las composiciones mostradas en la Tabla 3.3 (Figura 3.10).



Figura 3.10. Preparado de los componentes de la mezcla.

- 2- Mezcla de la arena y del PET de forma manual hasta lograr una aproximada homogeneidad de los materiales secos
- 3- Amasado del mortero por medio del siguiente procedimiento normalizado: Se vierte el agua a la mezcla de cemento dentro del recipiente. Se enciende la amasadora a velocidad lenta durante 30 segundos. Inmediatamente, durante 30 segundos adicionales se introduce la arena. Se continúa amasando

durante 30 segundos más a velocidad rápida. Se para la amasadora durante 90 segundos. En los primeros 30 segundos se retira con una espátula metálica el material adherido al recipiente y se coloca en el centro de la amasadora. Se continúa el amasado durante 60 segundos a velocidad rápida.

- 4- Enmoldado de las probetas inmediatamente después de la preparación del mortero. Se llenan los moldes hasta la mitad y se sacude con 60 golpes de forma manual. Se introduce la segunda capa de mortero con un excedente y somete a compactación manual con 60 golpes más. Se quita el exceso de mortero con la regla plana para lograr una superficie uniforme y lisa (Figura 3.11).



Figura 3.11. Enmoldado de las probetas.

- 5- Se etiquetan los moldes para su respectiva identificación.
- 6- Se conservan en ambiente de laboratorio a 21°C y 60% de humedad durante 24 horas antes de desmoldar (Figura 3.12.).



Figura 3.12. Probetas tras 24h en el molde.

- 7- Se lleva a cabo el desmoldado de forma sencilla abriendo la cara lateral de la probeta y se marcan las probetas con tinta resistente al agua (Figura 3.13)



Figura 3.13. Probetas desmoldadas y etiquetadas.

- 8- Finalmente se introducen en la cámara de humedad según refleja la norma UNE-EN 196-1:2005 (UNE-EN 196-1, 2005), donde se albergarán durante 7 o 28 días para su curado. La humedad relativa en el interior será 95% y 22°C la temperatura (Figura 3.14).



Figura 3.14. Cámara de humedad.

- 9- Una vez concluido el tiempo de endurecimiento dentro de la cámara de humedad, las probetas se introducen en acetona durante 24 horas. Esto sirve para detener el proceso de curado del mortero

3.4. Caracterización física y química de los morteros

3.4.1. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido

La determinación de la densidad aparente de los morteros se ha realizado mediante el ensayo fijado a la normativa UNE-EN 1015-10:2000 (UNE-EN 1015-10, 2000), elaborada por el comité técnico AEN/CTN 83 y aprobada por el Comité Europeo de Normalizado (CEN) el 08/07/1999.

La densidad aparente en seco de una probeta dada de mortero endurecido se determina dividiendo su masa en estado seco por el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua, en estado saturado.

En el ensayo se necesitan los siguientes datos y valores:

- $m_{s,sec}$ es la masa de la probeta del mortero endurecido, en kilogramos (kg);
- $m_{s,sat}$ es la masa de la probeta saturada del mortero endurecido, en kilogramos (kg);
- $m_{s,i}$ es la masa aparente de la probeta saturada del mortero endurecido sumergido en agua, en kilogramos (kg);

- ρ_w es la densidad del agua, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3);
- V_s es el volumen de la probeta de mortero endurecido, en metro cúbicos (m^3);

En el ensayo se necesitan los siguientes aparatos y accesorios:

- Una balanza, con una exactitud igual al 0,1% con relación a la masa total de la probeta, provista de un estribo porta-probetas para pesar la probeta sumergida en el agua (Figura 3.15).

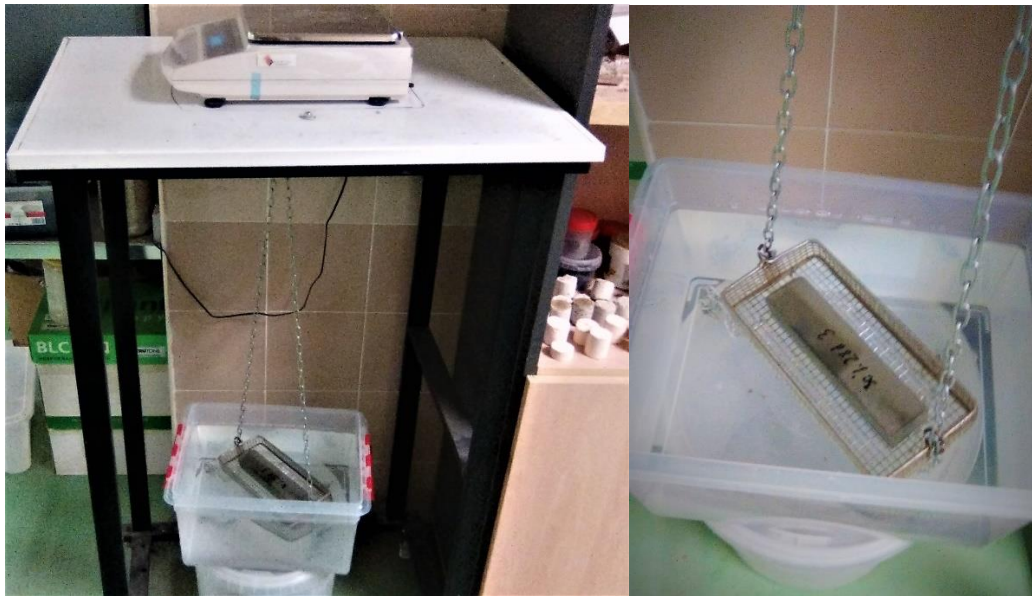


Figura 3.15. Balanza con estribo.

- Agua de ensayo para sumergir las probetas
- Recipiente listo para ser llenado del agua, en el cual se introducirán las probetas sobre el estribo, tal como se muestra en la Figura 3.15.

Secado a masa constante: Las probetas se secan en el laboratorio a una temperatura ambiente, durante el tiempo necesario para obtener una masa constante. El tiempo de secado fue lo suficientemente espaciado, así que no fue necesario el uso de la estufa. Se considera que la probeta ha alcanzado una masa constante cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas a intervalos de 2 horas de secado, no difieren en mas de 0,2% de la masa de la probeta seca. Se anota la masa de la probeta, $m_{s,sec}$, en kg con una exactitud aproximada del 0,1%

Determinación del volumen de la probeta por desplazamiento volumétrico:

La norma propone que la probeta se sumerge en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta que no se observe aumento de la masa aparente, siendo así cuando entre dos pesadas de 15 min de intervalo entre ellas no difieran en mas del 0,2%. Tras esto, la probeta húmeda se pesa después de haber eliminado el exceso de agua con un paño húmedo y se anota su masa, $m_{s,sat}$, en kg con una exactitud aproximada del 0,1%.

En este caso en el laboratorio, para asegurar la saturación de las probetas, se siguió un camino diferente pero que asegura un resultado igual al obtenido al seguir la norma. Para asegurar la saturación correcta de las probetas, éstas se sumergieron completamente en agua durante 24 horas (Figura 3.16).



Figura 3.16. Probetas sumergidas en agua.

Después de obtener las probetas se pesan después de haber eliminado el exceso de agua con un paño húmedo y se anota su masa, $m_{s,sat}$, en kg con una exactitud aproximada del 0,1%, como se señaló anteriormente.

Para el pesado en el estribo, se deja que la balanza alcance el equilibrio, asegurándose que el estribo vacío está suspendido (que no está en contacto con ninguna pared del recipiente, ni el estribo ni la cadena) y que está completamente sumergido en el agua de recipiente. El estribo se sumerge hasta la misma profundidad en las que se efectúa el equilibrio. La probeta se coloca en el estribo. Se eliminan las burbujas de aire atrapadas en las caras de la probeta. La probeta en esta posición

(sumergida) cuando ha cesado la oscilación de la balanza hidrostática se pesa y se anota la masa de la probeta, $m_{s,i}$, en kg en esta posición sumergida.

El volumen de la probeta, en m^3 , se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w} \quad [3.5]$$

Densidad aparente en seco: Se calcula dividiendo la masa de la probeta seca, $m_{s,sec}$, en kilogramos, por el volumen de la probeta del mortero endurecido, V_s , en metros cúbicos.

$$\rho_a = \frac{m_{s,sec}}{V_s} \quad [3.6]$$

El valor medio se calcula a partir de los valores individuales obtenidos para cada probeta de mortero, todos los valores se redondean, aproximadamente, a 10 kg/m³.

3.4.2. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

Para este ensayo se sigue la norma UNE-EN 1015-18:2002 (UNE-EN 1015-18, 2002), elaborada por el comité técnico AEN/CTN 83 y aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) el 06-07-2002. La norma tiene por objeto especificar un método de ensayo para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos que contienen conglomerantes minerales y áridos normales y ligeros.

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad se determina en probetas de mortero, después del secado a masa constante, y tras la realización del ensayo a flexión, por tanto, por cada probeta, tendremos dos muestras, es decir, 6 muestras por porcentaje y días de curado.

En el ensayo se necesitan los siguientes valores:

- M1 es la masa de la probeta después de una inmersión durante 10 min, en gramos (g);
- M2 es la masa de la probeta después de una inmersión durante 90 min, en gramos (g);

- C es el coeficiente de absorción de agua de una probeta individual de mortero, $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})]$.

En el ensayo se necesitan los siguientes aparatos y utilidades:

- Bandeja, con una profundidad mínima de 20 mm y una superficie plana suficientemente grande para contener las probetas que se han de sumergir; además, debe estar equipada con un dispositivo que permita mantener un nivel constante de agua.
- Cuatro soportes o elementos similares por probeta, con una superficie mínima para que la probeta repose a una distancia conveniente del fondo del recipiente en función de la profundidad de inmersión especificada.
- Balanza, con una exactitud de 0,1% de la masa total seca de la probeta.
- Estufa ventilada, capaz de mantener una temperatura de $(60 \pm 5) ^\circ\text{C}$ (Figura 3.17)



Figura 3.17. Estufa ventilada.

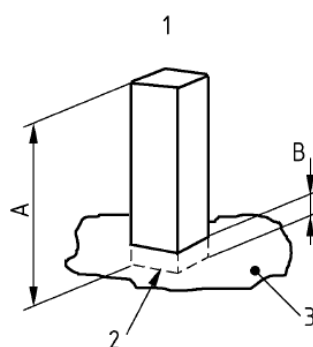
- Papel de filtro absorbente
- Agua destilada
- Material de sellado, por ejemplo: cera de parafina (Figura 3.18).



Figura 3.18. Cera de parafina.

Procedimiento: Las probetas se colocan en la bandeja, con las caras laterales impregnadas con el material aislante, de forma que únicamente el agua pueda penetrar por la cara de rotura. Las caras rotas (superficie de rotura) de los prismas deben estar vueltas hacia abajo, sobre los cuatro soportes e manera que no toquen el fondo de la bandeja y se sumergen en agua hasta una altura de 5 mm a 10 mm durante la duración del ensayo. Las probetas se colocan en el agua inclinándolas con el fin de asegurar la inmersión completa de las probetas con superficies rugosas y evitar la formación de burbujas de aire.

Una vez dispuestas las probetas y sumergidas, se mantienen hasta 10 minutos y se retiran del recipiente, se elimina rápidamente el agua superficial con el papel absorbente. Se pesan las probetas (M1). Se repite el mismo procedimiento después, pero con las probetas sumergidas durante 90 minutos y se vuelven a pesar (M2).



Leyenda

- 1 Probeta prismática
- 2 Cara de rotura del prisma
- 3 Superficie de agua

A Aproxinadamente, 80 mm

B Profundidad de inmersión de 5 mm a 10 mm *

* 10 mm si la superficie es muy rugosa

Figura 3.19. Colocación de probetas del ensayo. Fuente: Norma UNE-EN 1015-18. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, Parte 18.



Figura 3.20. Probetas durante el ensayo de absorción de agua por capilaridad.

Finalmente, una vez tomados los datos de los pesos de las probetas, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es, por definición, igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medidas tomadas después de 10min y después de 90 min.

El coeficiente de absorción de agua se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$C = 0,1(M2 - M1) [kg/m^2min^{0,5}] \quad [3.7]$$

Los valores individuales del coeficiente de absorción de agua (C) se calculan con una aproximación de $0,05 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$, según el caso.

3.4.3. Determinación de la resistencia a flexión del mortero endurecido

Las probetas han sido sometidas a ensayos de flexión con el objetivo de comprobar su resistencia, pudiendo así valorar y comparar como afecta el porcentaje de PET en las propiedades mecánicas de los morteros.

El método de ensayo de los morteros endurecidos a flexión se ha realizado conforme a la norma UNE-EN 1015-11:1999 (UNE-EN 1015-11:1999), elaborada por el comité técnico AEN/CTN 83 y aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) el 07-08-1999.

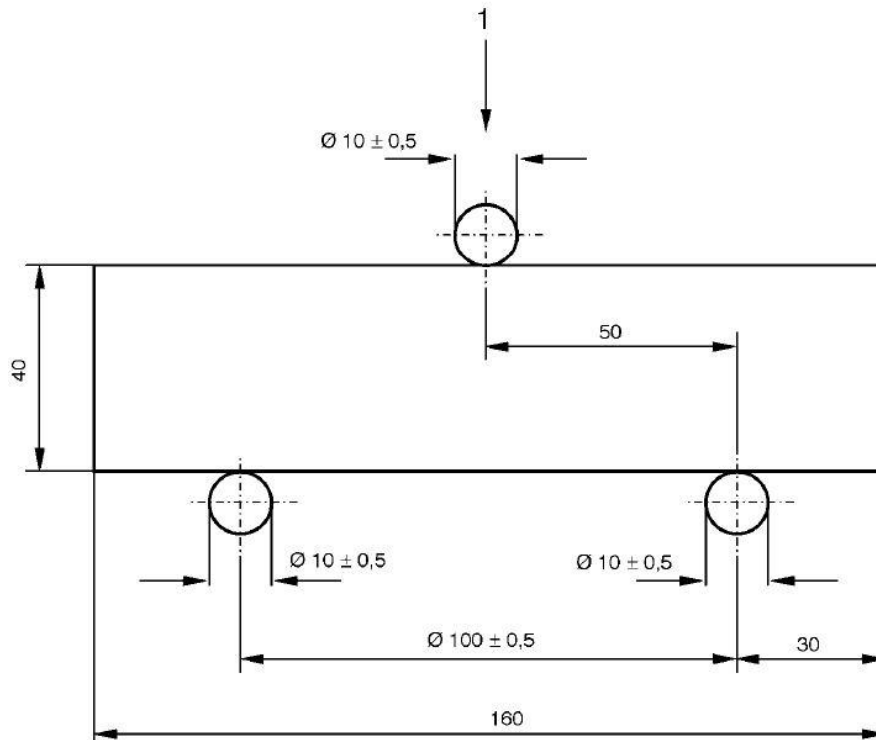
La resistencia a flexión de un mortero se determina aplicando una carga en tres puntos de los prismas enmoldados de mortero endurecido, hasta su rotura.

En el ensayo se necesitan los siguientes datos y valores:

- F es la carga máxima aplicada a la probeta, en Newtons (N);
- l es la distancia entre los ejes de los rodillos de apoyo, en milímetros (mm);
- b es el ancho de la probeta, en milímetros (mm);
- d es el grosor de la probeta, en milímetros (mm).

En el ensayo se necesitan los siguientes aparatos y utilidades:

- Máquina para realizar en el ensayo, capaz de aplicar la carga sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s. La máquina debe cumplir las exigencias de la Tabla 3.4. Debe estar provista de dos rodillos de apoyo de acero, con una longitud comprendida entre 45 mm y 50 mm y un diámetro de $10 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$, espaciados entre sí $100,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, y de un tercer rodillo de carga de la misma longitud y mismo diámetro, instalado centralmente entre los rodillos de apoyo (Figura 3.21; Figura 3.22.). Los tres planos verticales que pasan por los ejes de los tres rodillos deben ser paralelos y permanecer paralelos durante el ensayo, además deben estar equidistantes y perpendiculares a la dirección del prisma (probeta) sometido a ensayo. Uno de los rodillos de apoyo y el rodillo de carga deben poder oscilar ligeramente para permitir una distribución uniforme de la carga sobre el total del ancho del prisma sin someterlo a un esfuerzo de torsión.



1 Carga

Figura 3.21. Ensayo de resistencia a flexión. Fuente: Norma UNE-EN 1015-11:1999.

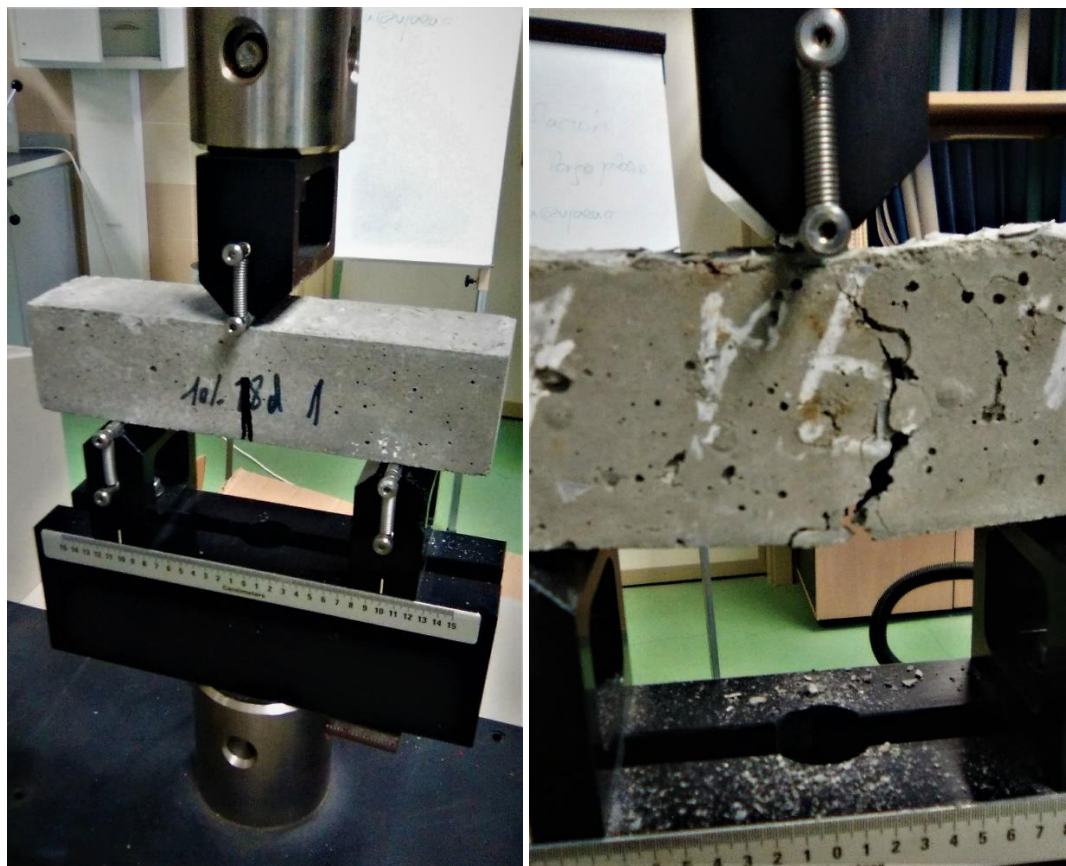


Figura 3.22. Ensayo de resistencia a flexión II.

Característica	Repetibilidad máxima admisible de las fuerzas en porcentaje de la fuerza nominal (%)	Error medio máximo admisible de la fuerza en porcentaje de la fuerza nominal (%)	Error máximo admisible de la fuerza cero en porcentaje de la fuerza máxima del recorrido (%)
Porcentajes →	2,0	± 2,0	± 0,4

Tabla 3.4. Requisitos para las máquinas de ensayo mecánico. Fuente: Norma UNE-EN 1015-11:1999.

Para la preparación del ensayo, se retiran las probetas del lugar de conservación, se colocan de forma que una de las caras de contacto de las paredes del molde esté sobre los rodillos de apoyo y se realiza el procedimiento según las especificaciones y procedimiento de la máquina. Una vez llegado al final del ensayo y se produzca la rotura (Figura 3.23.), ésta se retira y se limpia la máquina con un paño a fin de evitar que los restos caídos provoquen interferencias en el siguiente ensayo. Las probetas rotas deben ser devueltas al lugar de conservación para el próximo ensayo de compresión.



Figura 3.23. Probetas tras el ensayo de flexión.

La carga máxima aplicada que proporciona la máquina, se registra en N y la resistencia a flexión, f , en N/mm² se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad [3.8]$$

Se debe registrar la resistencia a flexión de cada probeta, aproximadamente a 0,05 N/mm², y el valor medio con una aproximación de 0,1 N/mm².

3.4.4. Determinación de la resistencia a compresión del mortero endurecido

Las probetas han sido sometidas a ensayos de compresión con el objetivo de comprobar así su resistencia, pudiendo valorar y comparar como afecta el porcentaje de PET en las propiedades mecánicas de los morteros.

El método de ensayo de los morteros endurecidos a compresión se ha realizado conforme a la norma UNE-EN 1015-11:1999 (UNE-EN 1015-11:1999), elaborada por el comité técnico AEN/CTN 83 y aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) el 07-08-1999.

La resistencia a compresión del mortero se determina en cada una de las dos mitades (semiprismas) resultantes del ensayo de la resistencia a flexión.

En el ensayo se necesitan los siguientes datos y valores:

- F es la carga máxima aplicada a la probeta, en newtons (N);
- b es el ancho de la probeta, en milímetros (mm);
- d es el grosor de la probeta, en milímetros (mm).

En el ensayo se han necesitado los siguientes aparatos y utilidades:

- Máquina de ensayo (Figura 3.24.) capaz de aplicar la carga sin aceleraciones, y aumentando progresivamente a un ritmo comprendido entre 50 N/s y 500 N/s de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s. El plato superior de la máquina debe poder alinearse libremente desde que entre en contacto con la probeta, pero los platos no deben poder inclinarse uno frente al otro durante la aplicación de la carga. La máquina debe cumplir las especificaciones de la Tabla 3.4.



Figura 3.24. Máquina para el ensayo de compresión. Modelo: 810 MTS.

- Dos platos de tungsteno o de acero, con una dureza Vickers de la superficie de al menos 60 HV conforme con la Norma Europea EN ISO 6507-1. Los platos deben tener 40,0 mm de longitud x 40,0 mm $\pm$ 0,1 mm de ancho y 10 mm de espesor. La tolerancia de la planeidad sobre la totalidad de la superficie de contacto debe ser de 0,01 mm. En este ensayo se dispuso de unos platos de 15 mm de diámetro y 10 mm de espesor.

- Adaptador para el ensayo de compresión utilizado para facilitar la colocación de los platos de apoyo. El dispositivo adaptador dispone de dos partes, las cuales acomodan la probeta en su interior, donde un saliente cúbico de 40 mm x 40 mm ejerce la presión (Figura 3.25). La probeta es apoyada sobre otro saliente de las mismas características.



Figura 3.25. Adaptador para el ensayo de compresión.

Para la preparación del ensayo, se retiran las probetas del lugar de conservación, se colocan de forma que una de las caras de contacto de las paredes del molde esté sobre la base de apoyo cuadrada y se realiza el procedimiento según las especificaciones y procedimiento de la máquina. Una vez llegado al final del ensayo y se produzca la rotura (Figura 3.26.), ésta se retira y se limpia la máquina con un paño a fin de evitar que los restos caídos provoquen interferencias en el siguiente ensayo.



Figura 3.26. Probeta tras en ensayo de compresión.

Una vez ejecutado el ensayo, la carga máxima aplicada, en N, durante el ensayo se registra. La resistencia, f_c , se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta por su sección transversal.

$$f_c = \frac{F}{d \cdot b} \quad [3.9]$$

Se registra la resistencia de cada probeta, con una aproximación de 0,05 N/mm². La media, se calcula con una aproximación de 0,1 N/mm².

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de las materias primas

4.1.1. Caracterización del Cemento Pórtland

4.1.1.1. Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa

Se presentan los datos obtenidos con respecto a la humedad, pH, contenido de materia orgánica, contenido de carbonatos, superficie específica y densidad relativa del cemento Pórtland tipo II (CP) (Tabla 4.1.).

Muestra	Humedad (%)	pH	Carbonatos (%)	Área superficial (cm ² /g)	Densidad aparente (g/cm ³)
CP	0,25	11,8	16,98 ± 0,96	3,670	2,840

Tabla 4.1. Valores de Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa

En base a los resultados obtenidos se puede indicar que el contenido en carbonatos en el cemento Pórtland es menor que en otros residuos similares usados en construcción. Además, la presencia de carbonatos en el cemento Pórtland se debe principalmente a la adición de caliza (CEM TIPO II).

Los valores de superficie específica del cemento Pórtland se han obtenido por el método de Blaine (Cebrian y Pisonero, 1971). A medida que aumenta la superficie específica se favorecen las reacciones puzolánicas de hidratación del cemento Pórtland, favoreciendo la formación de los productos sólidos insolubles dotados con resistencia mecánica.

4.1.1.2. Distribución granulométrica

La caracterización del cemento Pórtland refleja que está formado por un 86,30% de partículas de tamaño de la arena, un 1,75% de partículas de tamaño similar al limo y un 11,95 % de partículas finas (<2 mm) (Tabla 4.1). En la Figura 4.1. se muestra la distribución de tamaño de partícula del cemento presentando un tamaño medio de partícula D₅₀ de 10,64 µm. El cemento Pórtland está constituido por un 90% de partículas que están por debajo de 35,56 micras, lo que indica una importante finura. El tamaño de partícula influye en la actividad puzolánica debido a que la superficie de

las partículas aumenta junto con la velocidad de reacción hidráulica al disminuir el tamaño de partícula.

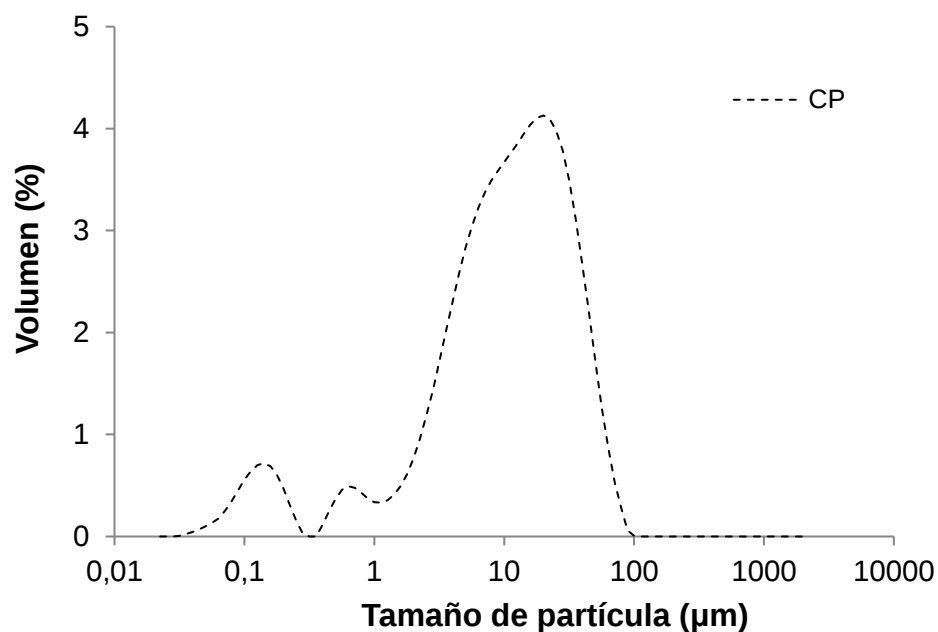


Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula del cemento Pórtland.

Distribución de tamaño de partícula	CP(%)
Contenido en partículas de tamaño arcilla < 0,002	11,95
Contenido en partículas tamaño limo (0,002-0,063)	86,3
Contenido en partículas tamaño arena (0,063-2)	1,75

Tabla 4.2. Porcentaje de partículas CP.

4.1.1.3. Análisis elemental (CHNS-O)

El análisis CHNS-O refleja que el cemento Pórtland no contiene apenas nitrógeno. Sin embargo muestra una presencia importante de azufre (0,420%). Su contenido en carbono se debe principalmente a la descomposición progresiva de la calcita y ronda el 0,66%.

En la Tabla 4.3 se reflejan los datos obtenidos en el análisis elemental.

Muestra	%C	%H	%N	%S
CP	0,657 ± 0,013	0,160 ± 0,011	0,003 ± 0,038	0,420 ± 0,012

Tabla 4.3. Analisis elemental (CNHS-O) del CP.

4.1.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

La composición química del cemento Pórtland se ha determinado por FRX. Los valores obtenidos de los contenidos en óxidos se observan en la Tabla 1.2. El cemento Pórtland es rico en CaO (58,8 %), presentando también un contenido bastante alto en SiO₂ (21,4%) y menores cantidades de Al₂O₃ (5,9 %) y Fe₂O₃ (3,9%).

Contenido en óxidos (%)	CP(%)
SiO ₂	21,33
Al ₂ O ₃	5,89
Fe ₂ O ₃	3,87
CaO	58,32
MgO	1,39
K ₂ O	0,88
Na ₂ O	0,91
MnO	0,06
TiO ₂	0,43
P ₂ O ₅	0,08
SO ₃	4,03
ZnO	-
Cl	0,08
Sr	0,07
Cr	0,02
Ni	0,01
Cu	0,03
Zn	0,03
Ba	0,07
Zr	82,7
LOI	2,61

Tabla 4.4. Composición química del CP.

4.1.1.5. Caracterización mineralógica (DRX)

En el patrón de difracción obtenido del cemento Pórtland (Figura 4.2.) se puede observar los picos de difracción de silicato dicálcico o belita (C_2S) y silicato tricálcico o alita (C_3S). Los componentes que se presentan en menor proporción son el aluminato tricálcico $3 CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A) y la aluminoferrita tetracálcica $4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF).

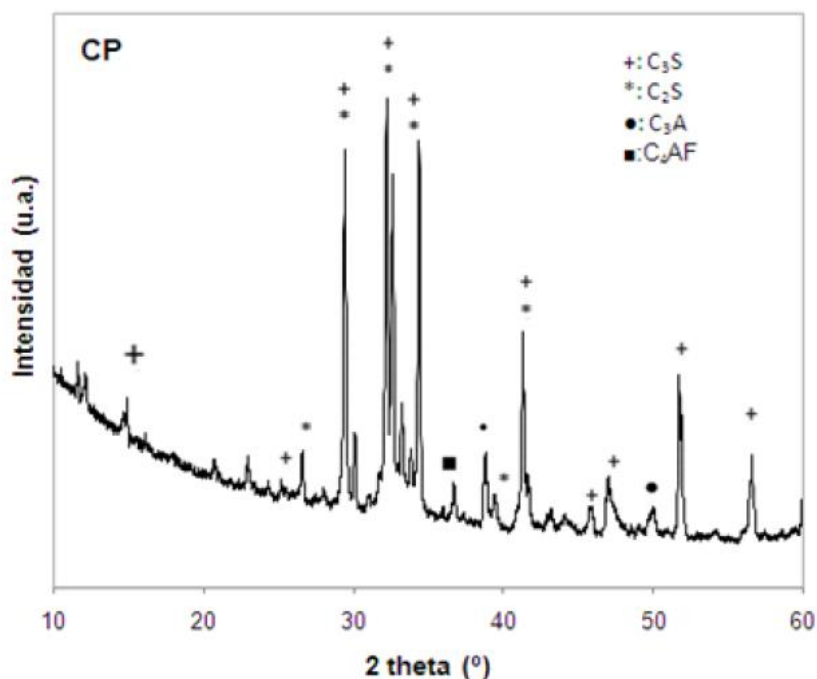


Figura 4.2. DRX del CP.

4.1.1.6. Caracterización microestructural (SEM)

El estudio microestructural del cemento Pórtland se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido y análisis EDX (Figura 4.3). Tras el estudio, se puede afirmar que la mayor parte de las partículas del cemento Pórtland son angulares con formas irregulares aunque presentan también partículas esféricas perfectas. Con el análisis EDX se obtiene que las partículas angulares están compuestas básicamente por Ca, encontrándose en menor medida: Si, Al, Mg Fe y S. Por otra parte, las partículas con formas más esféricas con más ricas en Si y Al, con menores cantidades de K.

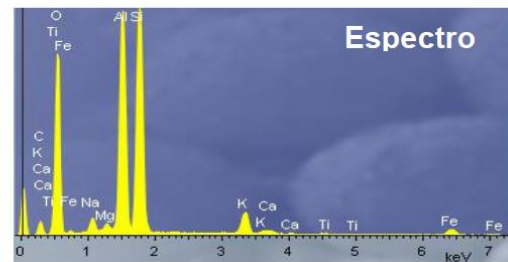
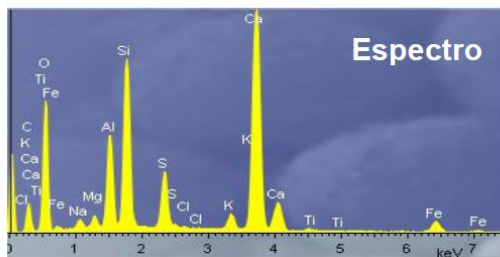
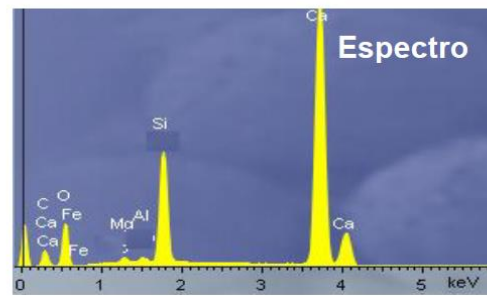
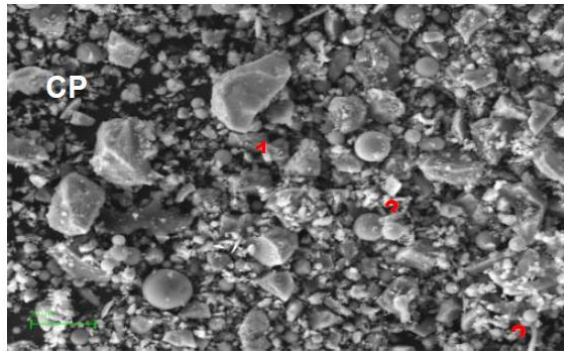


Figura 4.3. Espectros del estudio del CP.

4.2. Resultados de la caracterización del PET

En primera instancia, uno de los valores mas importantes a tomar en cuenta para el estudios de las probetas es la densidad del PET de forma triturada. Para obtener la densidad aparente del PET triturado, en el laboratorio, se utilizó una probeta en la cual se vertió un volumen determinado y después se obtenía en la balanza de precisión el peso de ese volumen concreto. El proceso se repitió diez veces para determinar de manera fiable la densidad.

Tras realizar las sucesivas medidas, para un volumen concreto de 50 ml de PET, se obtuve una media de 18,7 g de masa. Por tanto, se tiene la siguiente densidad:

$$\rho_{PET} = \frac{18,7 \text{ g}}{50 \text{ ml}} = 0,374 \text{ g/ml} \quad [4.1]$$

Por otra parte, se tienen las demás propiedades del PET en la Tabla 4.5.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad (no triturado)	g/cm ³	1,33-1,4
Resistencia a la tensión	MPa	59-72
Resistencia a la compresión	MPa	76-128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0,01-0,04
Dureza	Rockwell	M94-M101
Dilatación térmica	10-4/°C	15,2-24
Resistencia al calor	°C	80-120
Resistencia dieléctrica	kV/mm	13,8-15,8
Constante dieléctrica (60Hz)		3,65
Absorción de agua (24h)	%	0,02
Velocidad de combustión	Mm/min	Lenta
Efecto de luz solar		Decoloración ligera
Calidad del mecanizado		Excelente
Calidad óptica		Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244-254

Tabla 4.5. Características técnicas del PET. Fuente: Industria del Plástico. Richardson & Lokensgard.

4.3. Caracterización física y mecánica de los morteros

4.3.1. Densidad aparente de los morteros con PET

La densidad aparente de los morteros dependerá de los componentes que éstos tengan y todas sus características en conjunto, tanto la densidad individual, porcentaje de volumen de cada uno, granulometría, absorción de agua, tiempo de secado y curado...etc.

% vol. de PET	7 días		28 días	
	Densidad aparente (kg/m ³)	Desviación típica	Densidad aparente (kg/m ³)	Desviación típica
0	2159	3	2267	5
10	1975	11	2095	16
20	1957	12	2061	9
30	1939	12	2003	1
40	1852	52	1940	10
50	1760	3	1854	12

Tabla 4.6. Resultados del ensayo de densidad aparente.

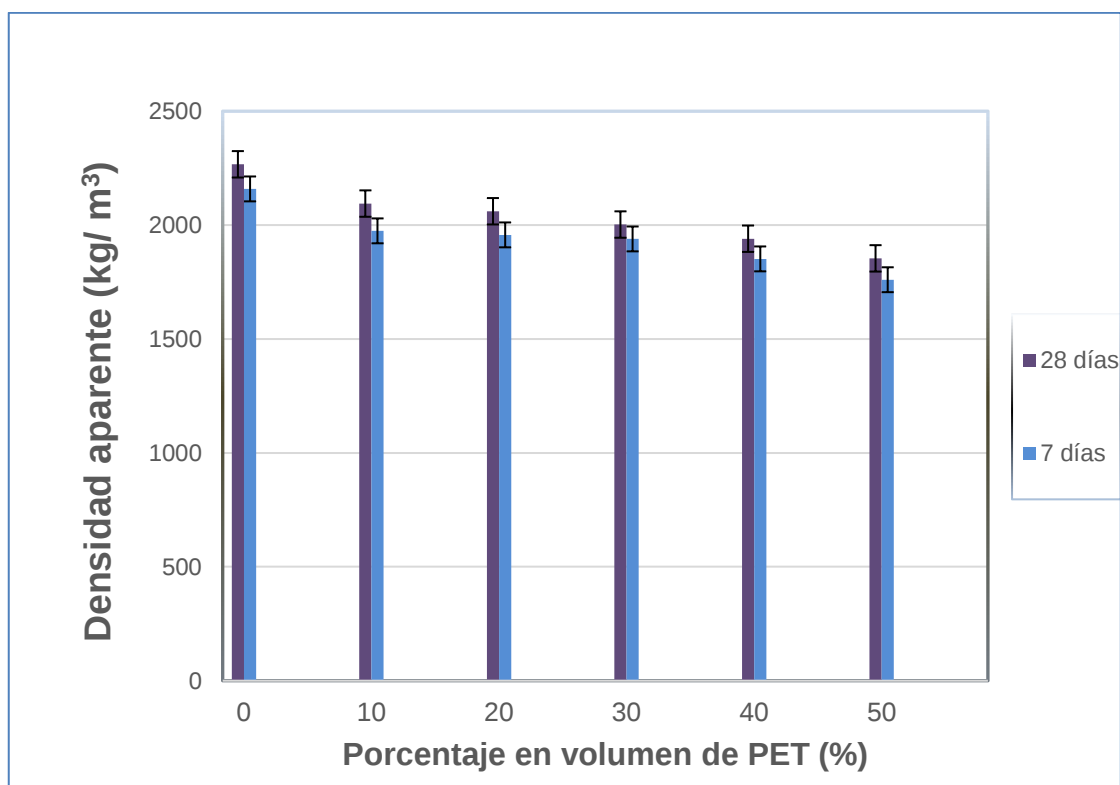


Figura 4.4. Resultados del ensayo de densidad aparente.

En el caso de los morteros aligerados con PET se observa una clara disminución de la densidad aparente conforme el porcentaje de PET aumenta en pos del porcentaje de arena. La tendencia descendente de la densidad aparente se debe a que el PET triturado posee una densidad menor que la arena. A parte de eso, se debe sumar el factor de compactación de la mezcla. El PET triturado, tiene forma de escamas o tiras, el cual es mucho mas difícil de compactar que la arena, sin contar su tendencia elástica de recuperar su forma tras aplicar cualquier tipo de presión que hace que siempre puedan quedar grandes poros o huecos entre las pequeñas partículas de plástico.

Comparando las densidades medias de la arena y del PET en el laboratorio se obtuvo que:

$$\rho_{PET} = \frac{18,7 \text{ g}}{50 \text{ ml}} = 0,374 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \quad [4.2]$$

$$\rho_{ARENA} = \frac{1350 \text{ g}}{780 \text{ ml}} = 1,731 \text{ g/mL} \quad [4.3]$$

La densidad de la arena fue medida teniendo en cuenta la cantidad de arena que se debe aportar al mortero control (0% PET), el cual posee unos 1350 g $\pm$ 5 g de masa y ocupa 780 ml según una media de mediciones realizada. Por tanto, se tiene que la arena tiene una densidad aproximadamente 4,63 veces superior a la del plástico usado.

En cuanto a los valores obtenidos de densidad aparente, tenemos unos máximos de 2095 kg/m³ y 1975 kg/m³ con 10% de PET y unos mínimos de 1845 kg/m³ y 1760 kg/m³ con 50% de PET para los morteros curados 28 y 7 días respectivamente. La disminución de la densidad es del 11,35% para el caso de 28 días de curado y del 11,22% para los morteros curados 7 días. Ambas disminuciones de densidad son practicamente iguales. Los morteros con una densidad aparente máxima de 1800 kg/m³ se pueden considerar ligeros, según la Norma Europea UNE-EN 1015-6 (UNE-EN 1015-6:1999), por tanto a partir de 50% en volumen de PET y 7 días de curación ya se obtienen morteros ligeros. No ocurre así con el caso de 28 días, pero está cerca de ese límite, el cual se rebasaría en el caso de añadir 60% en volumen de PET si se observa la clara tendencia decreciente de la densidad aparente.

En cuanto a la influencia del tiempo de curado en los morteros, se puede ver fácilmente en cuanto a la comparativa de nuestros dos tipos de mezclas en la Tabla 4.6 y Figura 4.4. Los morteros con 28 días de curado tienen una densidad ligeramente superior en todos los casos a los morteros de 7 días, esto indica que la adición de plástico no tiene ningún efecto en la aceleración de hidratación del mortero, totalmente al contrario, el plástico actúa como pequeñas barreras impermeables que dificultan la penetración de la humedad hacia el centro del mortero. Otro agravante pueden ser las “grandes” cavidades generadas por los recobecos de las virutas y escamas del plástico, pequeñas burbujas de aire que dificultan la hidratación del mismo, produciendo una red menos compacta. Por tanto, a tiempos de curado de 7 días, las reacciones de hidratación que darían lugar a los silicatos cálcicos hidratados, fases CSH, no se han llegado a completar y, por lo tanto, la red de poros no es tan compacta.

En conclusión, el factor determinante de la densidad aparente en morteros es la cantidad de residuo plástico incorporado, el cual actúa como aligerante implícito por su baja densidad y evitando o relentizando la hidratación del mortero por su capacidad impermeable y por la característica no compactadora del mismo.

4.3.2. Absorción de agua por capilaridad de los morteros con PET

La capacidad de absorción de agua de las probetas a través de su estructura interna, dependerá directamente de la distribución de poros presentada, compactación de la mezcla y composición química.

Una vez obtenidos los resultados que se recogen en la Tabla 4.7 y representados en función del porcentaje de residuo y el tiempo de curado (Figura 4.5.) se observan las siguientes tendencias:

% vol. de PET	7 días		28 días	
	Coeficiente de absorción C (kg/m ² min ^{0.5})	Desviación típica	Coeficiente de absorción C (kg/m ² min ^{0.5})	Desviación típica
0	0,23	0,14	0,12	0,06
10	0,24	0,09	0,13	0,06
20	0,39	0,32	0,10	0,02
30	0,31	0,08	0,24	0,04
40	0,39	0,13	0,26	0,03
50	0,48	0,08	0,41	0,14

Tabla 4.7. Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.

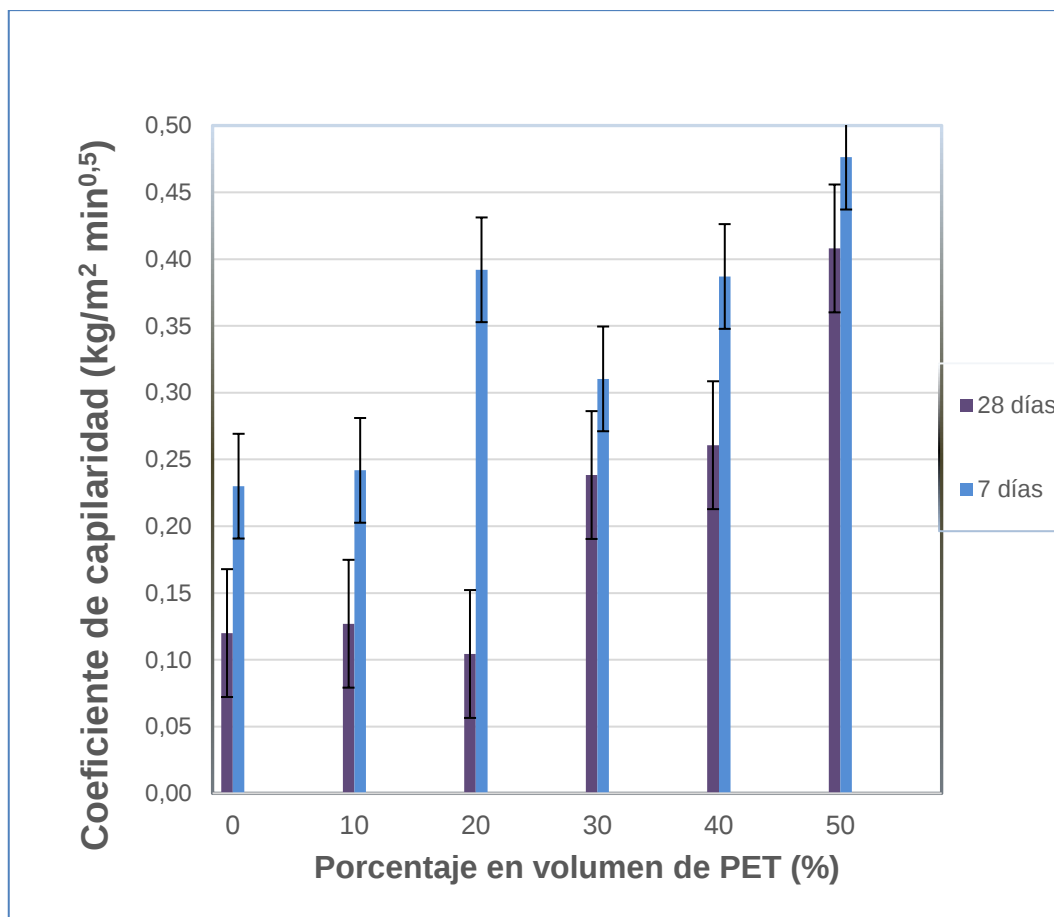


Figura 4.5. Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.

En cuanto al comportamiento de la absorción de agua por capilaridad en función de la cantidad aportada de residuo se observa una tendencia ascendente directamente proporcional al aumento del porcentaje de plástico aportado a la mezcla. Por tanto, el residuo tiene una implicación clara en el aumento de la absorción de agua por capilaridad debido a que el PET genera una porosidad y morteros menos compactos cuanto mayor es su porcentaje en la mezcla.

Por otro lado, respecto al tiempo de curado de las probetas, en todos los casos los morteros curados 7 días presentan un coeficiente de absorción de agua por capilaridad mayor que los morteros curados durante 28 días. Estos datos indican que el tiempo de curado tiene una influencia notable en la porosidad interconectada superficial, siendo más determinante este aspecto que en el ensayo de la densidad aparente, donde la diferencia de datos entre tiempos de curado es mucho más ligera. Las probetas tras 28 días de curado, se endurecen durante más tiempo y por tanto, se crean más silicatos de calcio hidratados (CHS) que son responsables de fases más

compactas y generan una estructura menos porosa y en consecuencia su coeficiente de absorción es menor.

En conclusión, se tienen morteros mas porosos y menos compactos al aumentar el porcentaje de residuo y mas aún si el tiempo de curado es corto. Lo óptimo para fabricar morteros mas impermeables y para evitar filtraciones de humedades, por ejemplo en viviendas, es un porcentaje bajo de residuo y un tiempo largo de curación.

4.3.3. Resistencia a flexión de los morteros con PET

La resistencia a flexión de las probetas, se ha valorado comparando las muestras respecto de su distinto tiempo de curado, y cómo influye el aumento de residuo en la resistencia final de rotura.

En la Tabla 4.8, se recogen los datos del ensayo de flexión de los distintos morteros ensayados.

% en vol. de PET	7 días		28 días	
	Resistencia a flexión (MPa)	Desviación típica	Resistencia a flexión (MPa)	Desviación típica
C0	5,96	0,44	8,10	0,63
10	5,59	0,14	6,60	0,83
20	5,64	0,24	5,82	0,69
30	4,95	0,25	5,64	0,83
40	4,76	0,08	4,80	0,27
50	3,90	0,14	4,19	0,37

Tabla 4.8. Resultados del ensayo de resistencia a flexión.

Teniendo en cuenta, el porcentaje de adición de PET en el mortero, se observa claramente una disminución de la resistencia a flexión a medida que se incrementa la cantidad de plástico. Esto es debido a que el plástico, a medida que aumenta la cantidad, se genera una estructura cada vez mas inconexa, ya que se producen malas adhesiones de la interfaz cemento-residuo, con mas cantidad de poros y lo que eso significa, concentradores de tensión que provocan una rotura cada vez mas temprana en el ensayo.

Las probetas control presentan valores de resistencia a flexión de 8,10 y 5,96 MPa para tiempos de curado de 28 y 7 días respectivamente. Para las probetas curadas durante 28 días se tiene el máximo valor de resistencia a flexión siendo de 6,60 MPa para un 10% en volumen de PET, lo que implica una reducción del 18,5 %. La adición de mayores cantidades de PET produce nuevos descensos aunque menos pronunciados de la resistencia a flexión, alcanzando valores de 4,19 MPa con la incorporación del 50 % en volumen de PET.

En cuanto al tiempo de curado en la Figura 4.6. se puede observar que las probetas tras 28 días de curado tienen una resistencia a flexión ligeramente superior a las probetas curadas durante 7 días. Esta mínima diferencia sugiere que a pesar de un mayor tiempo de curación, el residuo no consigue una buena integración en la estructura del mortero. Cada discontinuidad o zona donde el residuo no se ha integrado en la estructura interna del mortero actúa como un concentrador de tensión, que a su vez debilita la pieza a cualquier tipo de esfuerzo.

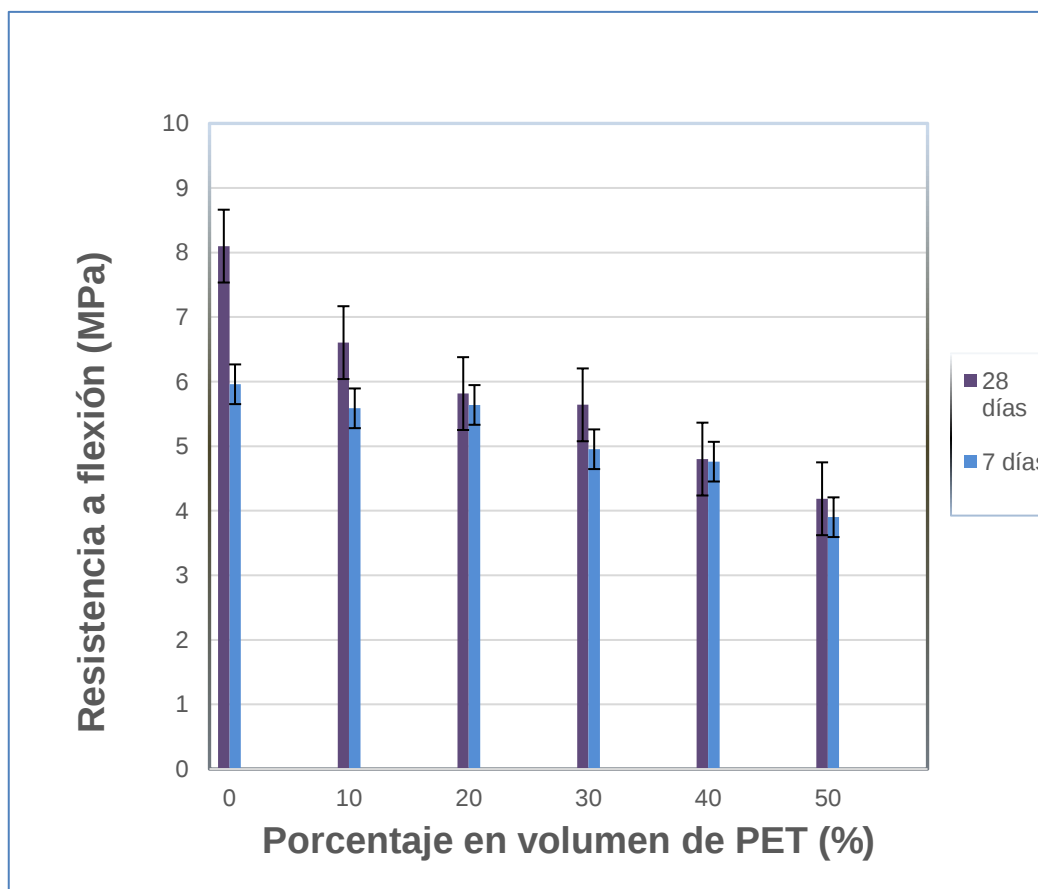


Figura 4.6. Resultados del ensayo de resistencia a flexión

4.3.4. Resistencia a compresión de los morteros con PET

La resistencia a compresión de las probetas, como se hizo anteriormente, se ha analizado en función del porcentaje de residuo y del tiempo de curado con el fin de ver cómo influyen ambos parámetros en la resistencia final de rotura.

En la Tabla 4.8. se recogen los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de los morteros con distintas adiciones de PET y tiempos de curado.

7 días			28 días	
% vol. de PET	Resistencia a compresión (MPa)	Desviación típica	Resistencia a compresión (MPa)	Desviación típica
0	27,50	3,01	28,29	4,73
10	16,03	1,29	16,11	1,00
20	17,02	1,27	17,17	1,85
30	18,15	2,76	17,09	2,02
40	14,52	1,72	12,24	1,19
50	12,81	1,58	12,63	1,38

Tabla 4.8. Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

Con respecto a la cantidad de adición de plástico en los morteros, en el caso de la resistencia a compresión no se muestra una tendencia clara descendente o ascendente de forma proporcional. Para morteros que contienen el 10%, 20% y 30% en volumen de PET se obtienen una resistencias a compresión similares, obteniendo el máximo de resistencia a compresión con la adición del 30% en volumen de residuo a ambos tiempo de curado. Nuevas adiciones de residuo del 40% y 50% en volumen de PET, da lugar a un descenso más pronunciado en la resistencia a compresión, debido a que para estos porcentajes, la fabricación y compactación del morteros es dificultosa por la forma escamosa del PET triturado. Esto origina unos morteros con

demasiados poros e imperfecciones internas que merman las características mecánicas.

Por otro lado, los morteros control (0% de PET) presentan resistencias a la compresión mucho mayores, del orden del 50% aproximadamente con respecto a los morteros que incorporan el residuo PET.

En cuanto a la comparación respecto del tiempo de curado, se puede observar en la Figura 4.7. que los datos obtenidos de resistencia a compresión de 7 días y 28 días son bastante similares (excepto en el caso de las probetas de mortero con 40% en volumen de PET, que hay una diferencia notable, pero que posiblemente sea producida por algún tipo de imperfección en las muestras de 28 días de curado). Esto indica que el tiempo de curado no es un factor clave para las propiedades mecánicas de los morteros aligerados con residuo plástico, contrariamente a lo esperado de acuerdo con los resultados obtenidos de las propiedades físicas, ya que, los morteros curados durante 28 días presentan mayores valores de densidad, y menores valores de absorción de agua por capilaridad, lo que indica una estructura más compacta y con menor porosidad. Ya en los datos de resistencia a flexión se obtiene la misma conclusión, que no es otra que el PET triturado tiene dificultades para integrarse en la estructura de los morteros. Esta incapacidad de integración es producida por la característica del plástico de mantenerse inerte ante los componentes químicos. Por tanto parece ser que impide que se formen compuestos endurecibles como consecuencia del proceso de hidratación que sería lo esperable a mayor tiempo de curado.

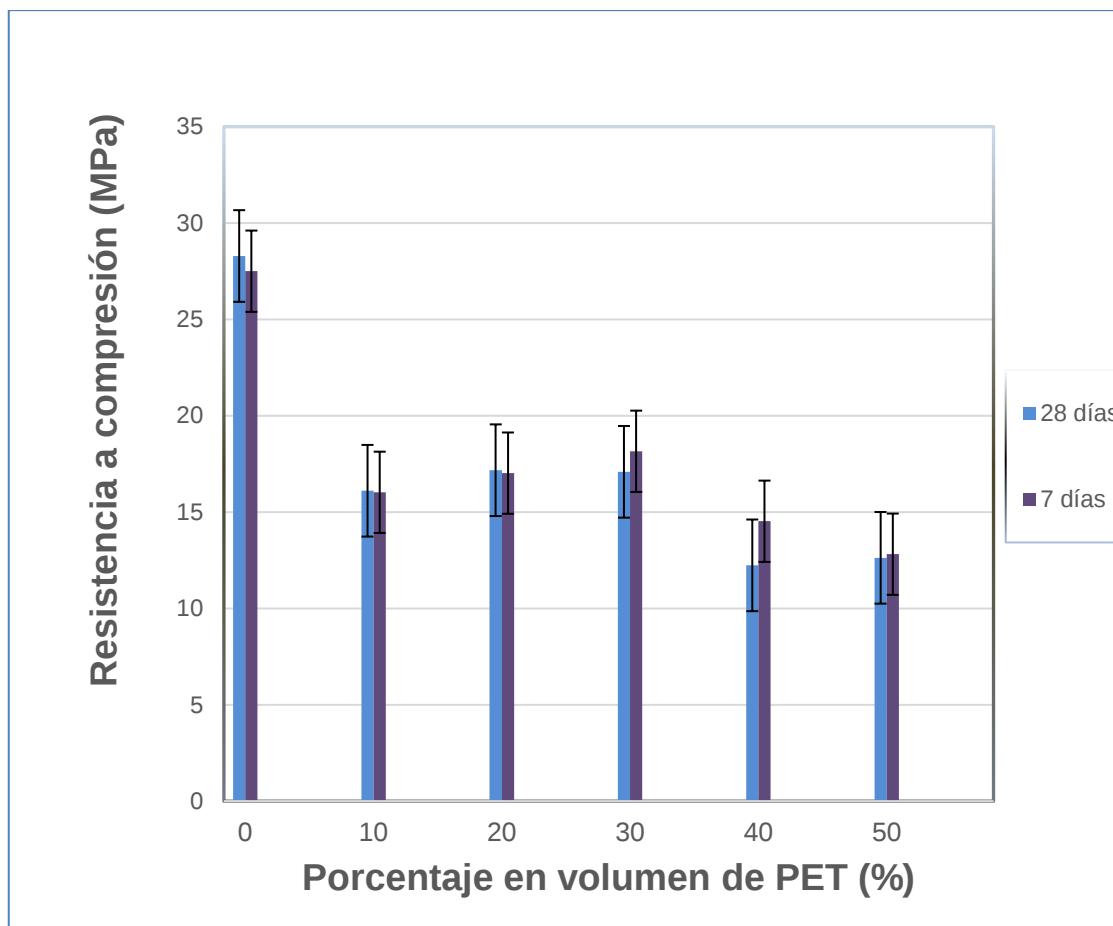


Figura 4.7. Resultados del ensayo de resistencia a compresión.

4.3.5. Relación de la densidad aparente con la resistencia a flexión de los morteros con PET

Tras la valoración de los resultados obtenidos en los ensayos de las propiedades mecánicas de los morteros aligerados con PET, una opción de interés es tomar referencias de cómo varían las propiedades mecánicas respecto a la densidad aparente de los morteros. Como se observó en los ensayos anteriores, tanto la resistencia a flexión como la densidad aparente presentaban una relación inversamente proporcional a la cantidad de residuo aportado a la mezcla, es decir, a mayor porcentaje de PET, menor resistencia a flexión y menor densidad presentaba la probeta. Esta tendencia es común independientemente del tiempo de curado, lógicamente la adición de residuo es el factor mas importante para determinar las características del producto final.

En la Figura 4.8, se muestra la relación resistencia a la flexión frente a densidad aparente para 7 días de curado.

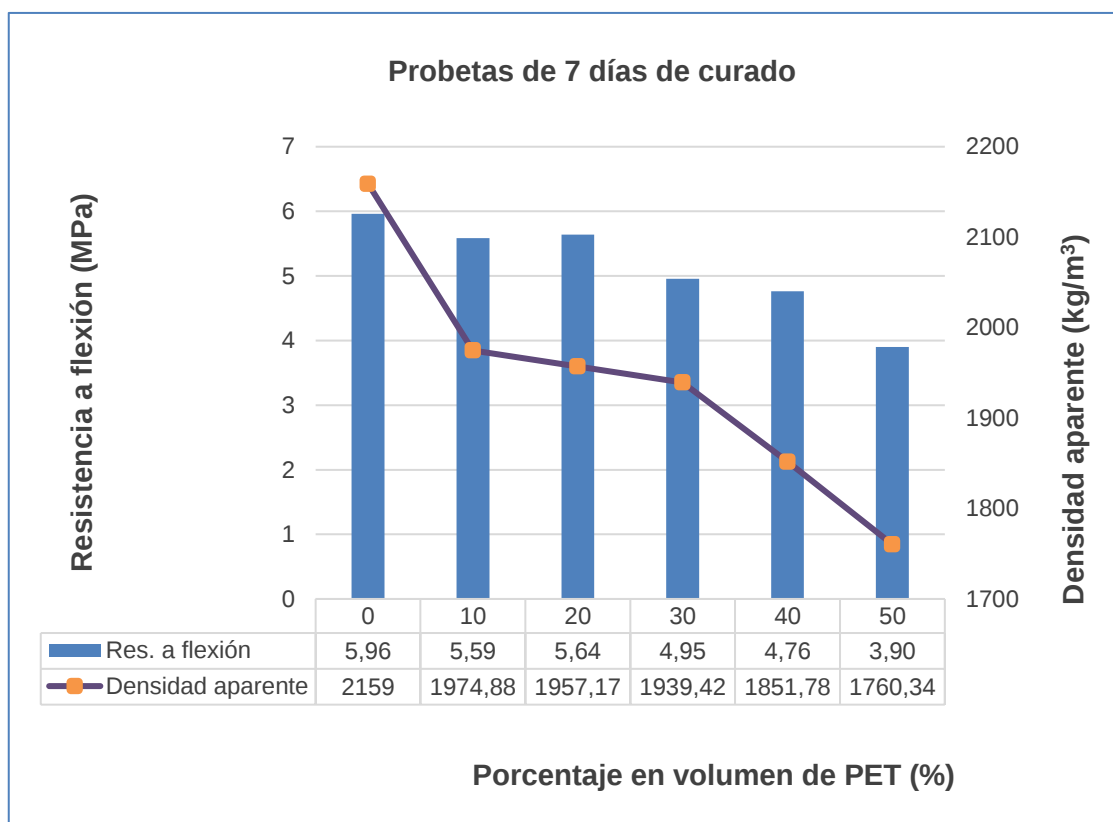


Figura 4.8. Comparación de resistencia a la flexión y densidad aparente (7 días).

Si se valoran los datos obtenidos, por ejemplo, entre los valores de 0% y 10% en volumen de PET la densidad aparente desciende un 8,53%, mientras que la resistencia a flexión sólo es mermada en un 6,2%. Y si comparamos los densensos entre 0% y 50% en volumen de PET, se obtiene que la densidad aparente disminuye un 18,5% y la resistencia a flexión un 34,5%. Ésto lleva a la conclusión de que para valores de 10% y 20% en volumen de PET la densidad desciende más que las propiedades mecánicas, lo cual puede ser muy útil a la hora de necesitar unas prestaciones de poco peso y una relativa alta resistencia a flexión. En cuanto a los siguientes porcentajes, también pueden ser utilizados en aplicaciones necesitadas de poco peso estructural y una resistencia a flexión menos elevada.

En la Figura 4.9, se muestra la relación resistencia a la flexión vs densidad para los morteros curados durante 28 días.

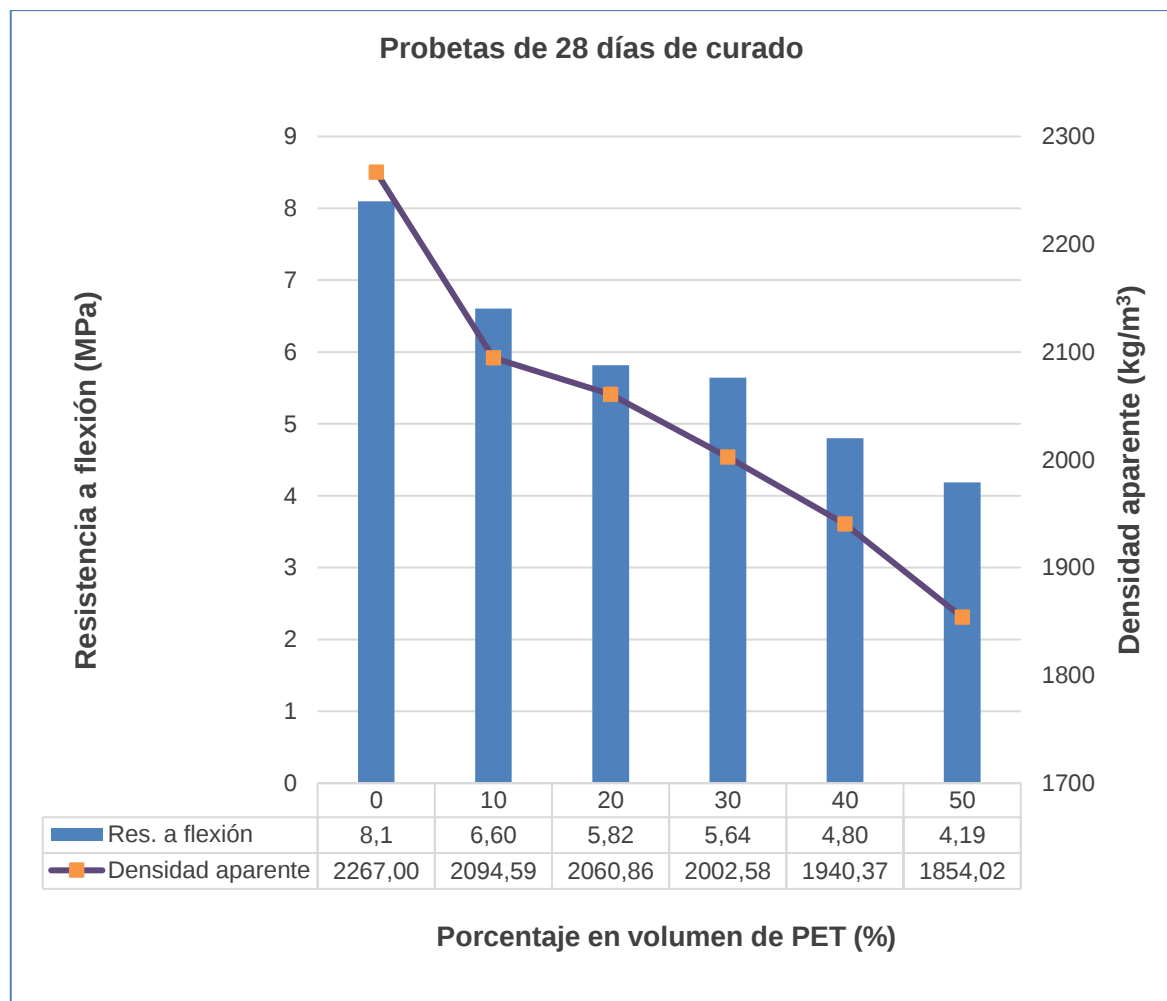


Figura 4.9. Comparación de resistencia a la flexión y densidad aparente (28 días)

Para las probetas de mortero tras 28 días de curado ocurre lo mismo que en el caso anterior. Para valores bajos de adición de PET, se obtienen buenas características de resistencia/peso, pero a medida que se aumenta la cantidad de residuo las propiedades mecánicas de resistencia a flexión descienden en mayor medida.

4.3.6. Relación de la densidad aparente con la resistencia a compresión de los morteros con PET

Al igual que se ha valorado la comparación entre la densidad aparente con la resistencia a flexión, es de igual interés la comparación con la resistencia a compresión de los morteros aligerados. La tendencia de la densidad aparente es descendente como se ha descrito anteriormente, pero el caso de la resistencia a compresión mantiene unos valores constantes, incluso crecientes hasta el 30% en volumen de PET, para los morteros curados tanto a 7 como a 28 días.

En las Figuras 4.10 y 4.11, se muestran dichas relaciones para los tiempos de curado de 7 y 28 días respectivamente.

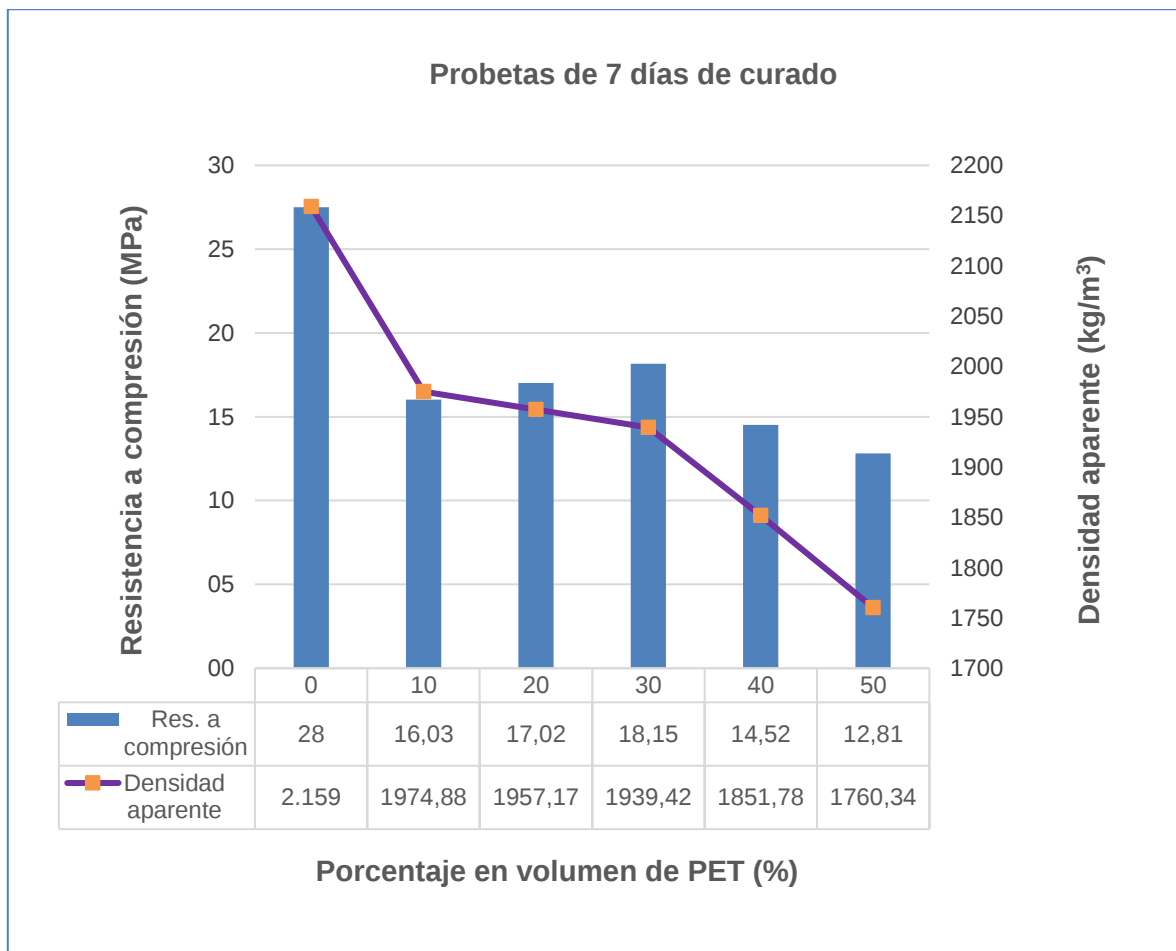


Figura 4.10. Comparación de resistencia a la compresión y densidad aparente (7 días).

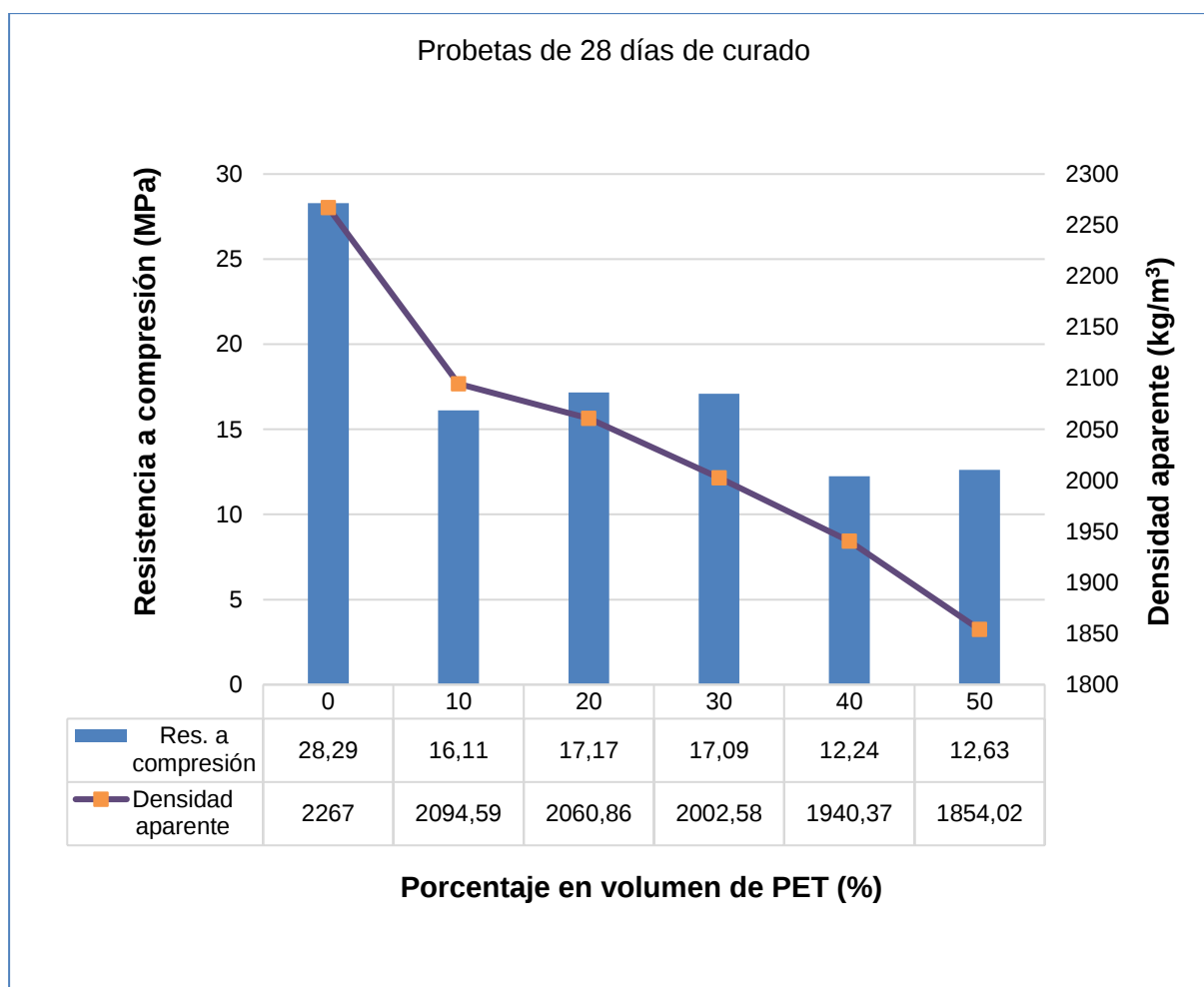


Figura 4.11. Comparación de resistencia a la compresión y densidad aparente (28 días).

Como se puede apreciar las Figura 4.10 y 4.11 son bastante similares. La conclusión que se obtiene de ellas, es que el mortero control es bastante mas resistente a compresión que los morteros aligerados con el residuo, pero también es mas pesado. Una vez añadido el residuo, es cierto que las propiedades mecánicas descienden, pero se mantienen constantes aproximadamente incluso hasta la adición del 30% en volumen de PET, con lo que se consigue un mortero bastante ligero, capaz de soportar cargas medias. Esto es realmente práctico para algunas aplicaciones en estructuras necesitadas de materiales menos densos pero capaces de resistir hasta ciertos límites de carga de compresión.

4.3.7. Relación resistencia a flexión/resistencia a compresión

La relación existente entre las resistencias a flexión y a compresión es una forma adecuada de conseguir una referencia de qué propiedad mecánica se ve mas afectada con el aumento de residuo en los morteros. Para ello, se obtiene el cociente “K” dividiendo la resistencia a flexión entre la resistencia a compresión, de la siguiente manera:

$$K = \frac{f}{f_c} \quad [4.1]$$

Siendo f la resistencia a flexión y f_c la resistencia a compresión.

Para las probetas de 7 días de curado en la Tabla 4.9. se recogen los valores obtenidos:

% vol. PET	K
0	0,22
10	0,35
20	0,33
30	0,27
40	0,33
50	0,30

Tabla 4.9. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la (7 días).

En la Figura 4.12 se representa la evolución del coeficiente K con respecto al porcentaje de PET añadido para los 7 días de curado.

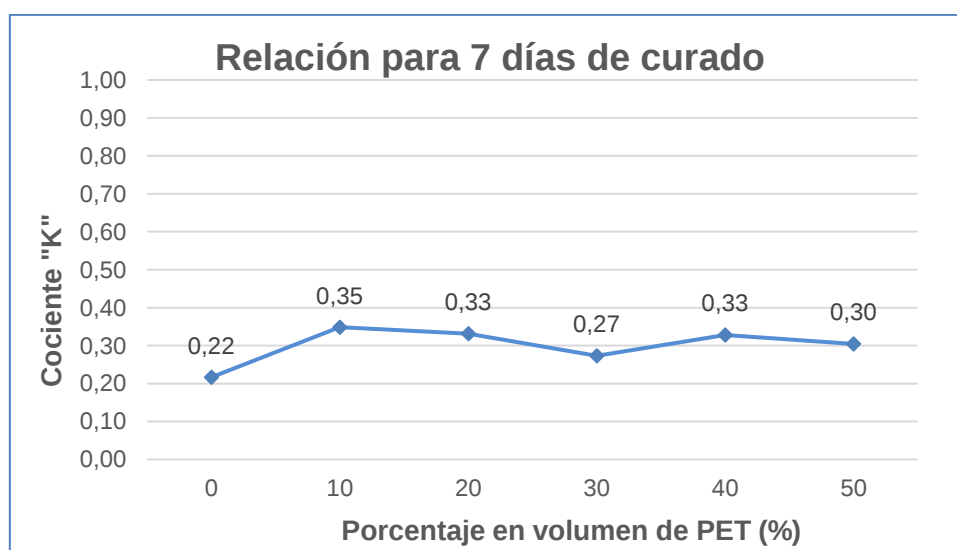


Figura 4.12. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a compresión (7 días).

Para las probetas de 28 días de curado en la Tabla 4.10 se recogen los valores obtenidos para el cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la compresión.:

% vol. PET	K
0	0,29
10	0,41
20	0,34
30	0,33
40	0,39
50	0,33

Tabla 4.10. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la compresión (28 días).

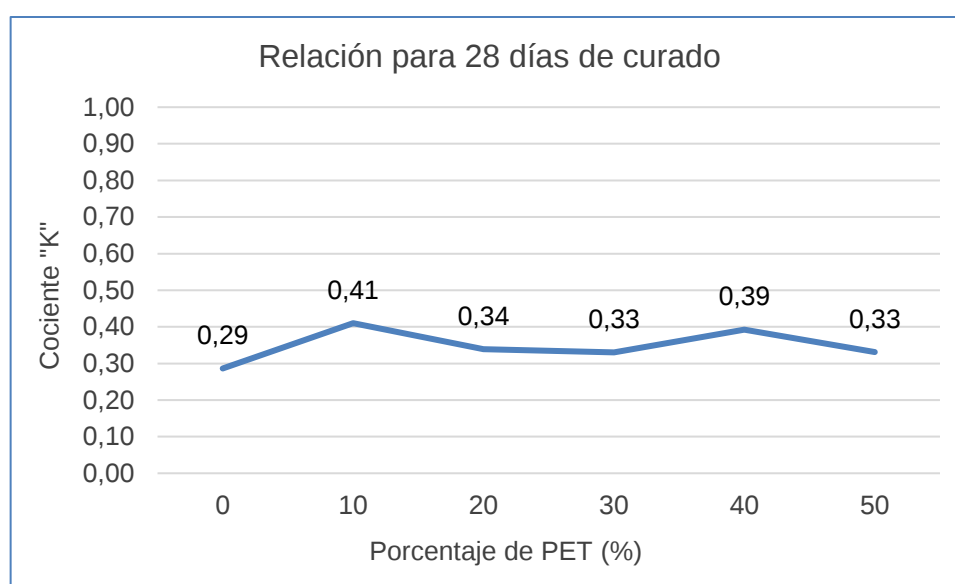


Figura 4.13. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la compresión (28 días).

Hay que partir desde la base desde la cual, para el cociente, se tienen como valores óptimos aquellos que se aproximan a 0,19 (Junco, 2012). En las probetas ensayadas, para ambos tiempos de curado se tienen valores por encima de este valor, siendo los valores obtenidos en los morteros con adición de PET incluso superiores que para el caso del mortero control.

La conclusión que reflejan los datos es que la resistencia a compresión es la propiedad mecánica que mas se ve afectada al añadir el residuo, sin embargo, se obtienen valores mas altos de lo que sería óptimo. Por consiguiente, los morteros aligerados con plástico se comportan mejor, en general, a esfuerzos de flexión.

4.4. Normativa europea y prescripciones sobre el uso de morteros.

Con los resultados de los ensayos, a continuación se ha valorado según la norma, para qué aplicaciones son aptos estos tipos de morteros.

En primer lugar, se va a informar sobre la nueva designación de los morteros, respecto de la nueva Normativa Europea. Los morteros según la norma UNE-EN 998-2:2012 (UNE-EN 998-2, 2012) son diferenciados en:

Morteros para albañilería diseñados: Morteros cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante con el fin de obtener las propiedades especificadas (concepto de prestación). La prestación corresponde principalmente a la resistencia.

Morteros para albañilería prescritos: Morteros que se fabrican en unas proporciones determinadas y cuyas proporciones dependen de las de los componentes que se han declarado (concepto de receta).

La forma más común de prescribir los morteros es conforme a su resistencia. Así, los morteros diseñados se clasifican conforme a su resistencia a compresión, designada con la letra “M” seguida de la clase de resistencia a compresión en N/mm². M-1, M-2.5, M-5, M-7.5, M-10, M-15, M-20, Md(> 25 N/mm²). En la Tabla 4.11, se resumen las indicaciones de la Norma.

MORTEROS PARA ALBAÑILERÍA		
Tipos de aplicación	Tipos de obra	Mortero
Tabiquería, particiones	L.H.D.	M-5
Fábrica no resistente revestida. Cerramientos	Bloque de hormigón	M-5, M-7.5
Fábrica resistente. No armada	Bloque de hormigón	M-7.5
Fábrica armada	Bloque de hormigón	M-7.5
Fábrica de alta resistencia	Bloque de hormigón	M-10 ó superior

Tabla 4.11. Especificaciones de morteros para albañilería. Norma UNE-EN 998-2.

La Tabla 4.11 muestra aplicaciones con sus prescripciones de resistencia a compresión, según la norma UNE-EN 998-2, totalmente aptas para los morteros aligerados con residuo plástico.

Si se continúa con especificaciones para morteros destinados al revoco o enlucido (norma UNE-EN 998-1), la nueva designación se va a realizar en base a tres propiedades, en el siguiente extracto de la citada norma, divididas en diferentes niveles según los valores indicados. Como se observa en la Tabla 4.12, las especificaciones necesarias son totalmente compatibles con los resultados obtenidos del ensayo. Algunos morteros de elevado porcentaje de PET (como el caso del 50% en volumen) tienen un elevado coeficiente de absorción de agua por capilaridad como para actuar como mortero de enlucido, pero todos los demás casos son totalmente aptos.

Propiedades	Categorías	Valores
Intervalo de resistencia a compresión a 28 días	CS I	0,4 a 2,5 MPa
	CS II	1,5 a 5,0 MPa
	CS III	3,5 a 7,5 MPa
	CS IV	≥ 6 MPa
Absorción de agua por capilaridad	W0	No especificado
	W1	$c \leq 0,40 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W2	$c \leq 0,20 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

Tabla 4.12. Clasificación de las propiedades del mortero endurecido.

4.4.1. Prescripción de morteros de revestimiento.

- Morteros para enlucidos interiores a base de cemento sin requerimientos permeables, con absorción de agua por capilaridad W0 y resistencias que, en función de los especificaciones, se encuentran entre: CS II 1,5-5 N/mm², CS III 3,5-7,5 N/mm², CS IV $\geq$ 6 N/mm²:

CS II - W0,

CS III - W0.

CS IV - W0.

- Morteros para revestimientos exteriores a base de cemento sin requerimientos permeables para enfoscados pintados u otros recubrimientos protectores con resistencias que se encuentran entre: CS III 3,5 - 7,5 N/mm² , CS IV $\geq$ 6 N/mm²:

CS IV - W0.

CS III - W0.

- Morteros para revestimientos exteriores a base de cemento para enfoscados pintados u otros recubrimientos protectores con resistencias que se encuentran entre: CS III 3,5 - 7,5 N/mm² , CS IV $\geq$ 6 N/mm² y absorciones por capilaridad (c) con valores $\leq$ 0,4 Kg./m² min^{0.5} equivalentes a W1:

CS III - W1.

CS IV - W1.

Morteros para revestimientos exteriores a base de cemento para enfoscados no pintados o exposición a viento y agua moderada, con resistencias CS III 3,5 - 7,5 N/mm² y absorciones por capilaridad (c) con valores $\leq$ 0,4 Kg./m² min^{0.5} equivalentes a W1:

CS III - W1.

- Morteros para revestimientos exteriores a base de cemento para enfoscados no pintados o exposición a viento y agua moderada, con resistencias CS IV $\geq$ 6 N/mm² y absorciones por capilaridad (c) con valores $\leq$ 0,4 Kg./m² min^{0.5} equivalentes a W1:

CS IV - W1.

- Morteros para revestimientos exteriores a base de cemento para enfoscados no pintados o exposición a viento y agua elevada, con resistencias CS III 3,5 - 7,5

N/mm^2 , $\text{CS IV} \geq 6 \text{ N/mm}^2$ y absorciones por capilaridad (c) con valores $\leq 0,2 \text{ Kg./m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ equivalentes a W2:

CS III - W2

CS IV - W2

4.4.2. Prescripción de morteros monocapa (OC)

- Morteros monocapa para enfoscados no pintados o exposición a viento y agua moderada, con resistencias $\text{CS IV} \geq 6 \text{ N/mm}^2$ y absorciones por capilaridad (c) con valores $\leq 0,4 \text{ Kg./m}^2 \text{ min}^{0,5}$ equivalentes a W1:

(OC) CS IV - W1

- Morteros monocapa para enfoscados no pintados o exposición a viento y agua elevada, con resistencias $\text{CS III } 3,5 - 7,5 \text{ N/mm}^2$, $\text{CS IV} \geq 6 \text{ N/mm}^2$ y absorciones por capilaridad (c) con valores $\leq 0,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ equivalentes a W2:

(OC) CS III - W2

(OC) CS IV - W2

4.4.3. Prescripciones para revestimientos continuos: enfoscados

En las Figuras 4.14 a 4.16, se muestran las prescripciones para revestimientos continuos:

Condición fachada CTE HS-1	Prestación según CTE HS-1	Norma UNE EN 998-1 (Marcado CE) Morteros de Revoco y Enlucido (1)
R	Resistencia a la filtración del revestimiento exterior	Designación del Mortero
	R1 El <i>revestimiento exterior</i> debe tener al menos una resistencia media a la filtración: - revestimientos continuos de las siguientes características: - o espesor comprendido entre 10 y 15 mm. - o Salvo los acabados con una capa plástica delgada. - revestimientos discontinuos rígidos pegados de las siguientes características: - o piezas menores de 300 mm. de lado; - o con disposición en la cara exterior de la <i>hoja principal</i> de un enfoscado de mortero.	OC CS III W1 ó OC CS IV W1 CS III W1 ó CS IV W1 CS III W1 ó CS IV W1
Revestimiento Exterior	R2 El <i>revestimiento exterior</i> debe tener al menos una resistencia alta a la filtración. Se considera que proporcionan esta resistencia los revestimientos discontinuos rígidos fijados mecánicamente dispuestos de tal manera que tengan las mismas características establecidas <i>para los discontinuos de R1</i>, salvo la del tamaño de las piezas.	CS III W1 ó CS IV W1 OC : Morteros monocapa Abs. agua por capilaridad: W1 c ≤ 0,40 kg/m²·min^{0.5} Resistencia a compresión: CS III (3,5-7,5 N/mm²) CS IV (≥ 6 N/mm²)

Figura 4.14. Prescripciones para revestimientos continuos.

Condición Fachada CTE HS-1	Prestación según CTE HS-1	Norma UNE-EN 998-1 (Marcado CE) Morteros de Revoco y Enlucido (1)
R R3 Revestimiento Exterior	Resistencia a la filtración del revestimiento exterior	Designación del Mortero
	El <i>revestimiento exterior</i> debe tener una resistencia muy alta a la filtración: - revestimientos continuos de las siguientes características: - o estanqueidad al agua suficiente para que el agua de filtración no entre en contacto con la hoja del cerramiento dispuesta inmediatamente por el interior del mismo. → W2 - o adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento muy bueno frente a la fisuración, de forma que no se fisure debido a los esfuerzos mecánicos producidos por el movimiento de la estructura, por los esfuerzos térmicos relacionados con el clima y con la alternancia día-noche, ni por la retracción propia del material constituyente del mismo → CS III ó CS IV (OC): Posibilidad Monocapa. Absorción agua por capilaridad: W2 $c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ Resistencia a compresión: CS III (3,5-7,5 N/mm²) CS IV ($\geq 6 \text{ N/mm}^2$)	(OC) CS III W2 ó (OC) CS IV W2

Figura 4.15. Prescripciones para revestimientos continuos II.

Condición Fachada CTE HS-1	Prestación según CTE HS-1	Norma UNE EN 998-1 (Marcado CE) Morteros de Revoco y Enlucido (1)
N	Resistencia a la filtración del revestimiento intermedio en la cara interior de la <i>hoja principal</i>	Designación del Mortero
	N1 Debe utilizarse al menos un revestimiento de resistencia media a la filtración. Se considera como tal un enfoscado de mortero con un espesor mínimo de 10 mm.	CS III W1 ó CS IV W1
	N2 Debe utilizarse un revestimiento de resistencia alta a la filtración. Se considera como tal un enfoscado de mortero con aditivos hidrofugantes con un espesor mínimo de 15 mm. o un material adherido, continuo, sin juntas e impermeable al agua del mismo espesor.	CS III W2 ó CS IV W2
Revestimiento Intermedio		Resistencia a compresión: CS III (3,5-7,5 N/mm ²) CS IV (≥ 6 N/mm ²) Absorción de agua por capilaridad: W1 $c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ W2 $c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

(1) En el caso de morteros industriales se comprobará que el producto tiene Marcado CE (Ver Anexo 1).

En el caso de utilizar morteros hechos en obra, deberán ensayarse las características requeridas en la Norma UNE EN 998-1 para este material (Ver Anexo 2).

Figura 4.16. Prescripciones para revestimientos continuos III.

Condición Fachada CTE HS-1	Prestación según CTE HS-1	Norma UNE EN 998-2 (Marcado CE) Morteros de Albañilería (2)
J	Resistencia a la filtración de las juntas entre las piezas que componen la <i>hoja principal</i>	Designación del mortero
	J1 Las juntas deben ser al menos de resistencia media a la filtración. Se consideran como tales las juntas de mortero sin interrupción excepto, en el caso de las juntas de los bloques de hormigón, que se interrumpen en la parte intermedia de la hoja;	$\rightarrow c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ M 5 ó M 7,5
	J2 Las juntas deben ser de resistencia alta a la filtración. Se consideran como tales las juntas de mortero con adición de un producto hidrófugo, de las siguientes características: - sin interrupción excepto, en el caso de las juntas de los bloques de hormigón, que se interrumpen en la parte intermedia de la hoja; - juntas horizontales llagueadas o de pico de flauta; - cuando el sistema constructivo así lo permita, con un rejuntado de un mortero más rico.	$\rightarrow c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ M 5 ó M 7,5 M: Resistencia a compresión (N/mm²) Absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 998-1): $W1 \ c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ $W2 \ c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$

(2) En el caso de **morteros industriales** se comprobará que el producto tiene Marcado CE (Ver Anexo 1).

En el caso de utilizar morteros hechos **en obra**, deberán ensayarse las características requeridas en la Norma UNE EN 998-2 para este material (Ver Anexo 2).

Figura 4.18. Prescripciones para morteros de juntas II.

4.4.5. Posibles aplicaciones para los morteros aligerados con PET.

Finalmente, teniendo en cuenta la normativa presentada, se va a realizar una valoración de los morteros que son aptos para las aplicaciones incluidas en las prescripciones anteriores.

En primer lugar, como los morteros son clasificados por clases, según su resistencia a compresión (Tabla 4.12), se contempla que la clase mas alta es CS IV para resistencias mayores a 6 MPa, superior a la clase CS III, para resistencias entre 3,5 y 7,5 MPa. Si se contrasta con los resultados obtenidos en el ensayo de compresión en el laboratorio (Tabla 4.8), las probetas de mortero aligerado con hasta 50% en volumen de PET, cumplen la normativa de resistencia a compresión para cualquier aplicación presentada por las anteriores prescripciones, ya sea para aplicaciones en albañilería (Tabla 4.11), morteros de revestimiento, enfoscados (Figuras 4.14 a 4.16), morteros monocapas y para juntas. Se recuerda que las resistencias mínimas a compresión obtenidas en el laboratorio se encuentran entre 12,24 y 12,81 MPa, para valores de 40-50% en volumen de sustitución de plástico, lo cual las sitúa en morteros de clase CS IV.

Por otro lado, la siguiente importante clasificación de morteros viene dada por el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (Tabla 4.8), el cual nos sitúa morteros de tipo W1, para coeficientes menores de $0,40 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$, y tipo W2, para coeficientes menores de $0,40 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$. En este caso, algunos morteros presentan dificultades para cumplir los requisitos de la normativa. En el caso de los morteros de 50% en volumen de PET, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es de 0,48 y 0,41 $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ para curados de 7 y 28 días respectivamente, por tanto, no cumplirían la normativa para las prescripciones presentadas. El resto de las muestras realizadas si que entran en morteros de tipo W1, incluso, para curados de 7 días, mezclas de 10 y 20% en volumen de PET cumplen perfectamente la normativa para morteros de tipo W2.

En conclusión, morteros de bajo porcentaje de PET (10 y 20% en volumen) y 28 días de curado son muy aptos para aplicaciones exigentes como para revestimientos exteriores “R3” (Tabla 4.15), revestimientos intermedios “N2” (Tabla 4.16), juntas de

fábrica revestida “C2” (Tabla 4.17), juntas de fábrica vista “J2” (Tabla 4.18), morteros de albañilería de fábrica de alta resistencia (M-10 ó superior)...etc.

Para morteros con mayor porcentaje de PET (superior al 20% en volumen) también hay aplicaciones para las cuales cumplen la normativa. Morteros de 30-40% en volumen de sustitución de plástico son de tipo W1 en cuando a la clasificación de absorción y tienen resistencias superiores a la clase CS IV o M-10, por tanto, pueden ser usados para revestimientos exteriores “R1” y “R2” (Tabla 4.15), revestimientos intermedios “N1” (Tabla 4.16), juntas de fábrica revestida “C2” (Tabla 4.17), juntas de fábrica vista “J1” (Tabla 4.18), morteros de albañilería de fábrica de alta resistencia (M-10 ó superior)...etc.

4.5. Estudio económico

Una vez realizadas todas la valoraciones de las propiedades mecánicas y físicas de los morteros aligerados con PET, hay que valorar la parte económica correspondiente a la fabricación de los mismos, pues es una parte igual de importante que sus propiedades.

Para el estudio económico se ha realizado una valoración de lo que supondrían los costes dependiendo de la cantidad de PET aportada al mortero. En primer lugar se ha realizado un estudio y una búsqueda en el mercado real de los precios de cada material por separado, obteniendo así los precios respecto a unidad de masa y unidad de volumen. Es interesante obtener los precios respecto a unidades volumétricas pues el hormigón se suele demandar de tal forma. El siguiente paso, una vez obtenidos los costes de los materiales en el mercado, ha sido calcular el precio de la mezcla final.

En la siguientes tablas se observan y comparan los precios aproximados por tonelada y metro cúbico que tendrían las amasadas de cada porcentaje de PET, sin incluir los costes de mano de obra, transporte, gasto energético ni ningún tipo de beneficio o impuesto, sólo el valor del producto en origen (Tablas 4.13 a 4.18).

MORTERO DE CONTROL						
Producto	Precio por peso (€/tn)	Precio por volumen (€/m ³)	Porcentaje en la mezcla (%)	Coste en mezcla €/probeta	Coste en mezcla €/tn	Coste en mezcla €/m ³
Cemento	96,81	106,25	0,22	0,015	21,51	5,67
Arena	1,27	1,27	0,67	0,001	0,85	0,22
Agua	14,75	26,55	0,11	0,001 €	1,64	0,43
PET (triturado)	400	149,6	0,00	0	0	0
TOTAL	-	-	1	0,016	24,00	6,33

Tabla 4.13. Coste del mortero aligerado con 0% de PET en volumen.

MORTERO DE 10% DE PET						
Producto	Precio por peso (€/tn)	Precio por volumen (€/m ³)	Porcentaje en la mezcla (%)	Coste en mezcla €/probeta	Coste en mezcla €/tn	Coste en mezcla €/m ³
Cemento	96,81	106,25	0,23	0,015	22,70	5,67
Arena	1,27	1,27	0,63	0,001	0,80	0,20
Agua	14,75	26,55	0,12	0,001	1,73	0,43
PET (triturado)	400	149,6	0,02	0,004	6,08	1,52
TOTAL	-	-	1	0,020	31,31	7,82

Tabla 4.14. Coste del mortero aligerado con 10% de PET en volumen.

MORTERO DE 20% DE PET						
Producto	Precio por peso (€/tn)	Precio por volumen (€/m ³)	Porcentaje en la mezcla (%)	Coste en mezcla €/probeta	Coste en mezcla €/tn	Coste en mezcla €/m ³
Cemento	96,81	106,25	0,25	0,01	24,02	5,67
Arena	1,27	1,27	0,60	0,00	0,76	0,18
Agua	14,75	26,55	0,12	0,00	1,83	0,43
PET (triturado)	400	149,6	0,03	0,01	12,87	3,04
TOTAL	-	-	1	0,024	39,48	9,32

Tabla 4.15. Coste del mortero aligerado con 20% de PET en volumen.

MORTERO DE 30% DE PET						
Producto	Precio por peso (€/tn)	Precio por volumen (€/m ³)	Porcentaje en la mezcla (%)	Coste en mezcla €/probeta	Coste en mezcla €/tn	Coste en mezcla €/m ³
Cemento	96,81	106,25	0,26	0,01	25,51	5,67
Arena	1,27	1,27	0,55	0,00	0,70	0,16
Agua	14,75	26,55	0,13	0,00	1,94	0,43
PET (triturado)	400	149,6	0,05	0,01	20,50	4,56
TOTAL	-	-	1	0,028	48,66	10,82

Tabla 4.16. Coste del mortero aligerado con 30% de PET en volumen.

MORTERO DE 40% DE PET						
Producto	Precio por peso (€/tn)	Precio por volumen (€/m ³)	Porcentaje en la mezcla (%)	Coste en mezcla €/probeta	Coste en mezcla €/tn	Coste en mezcla €/m ³
Cemento	96,81	106,25	0,28	0,01	27,20	5,67
Arena	1,27	1,27	0,51	0,00	0,64	0,13
Agua	14,75	26,55	0,14	0,00	2,07	0,43
PET (triturado)	400	149,6	0,07	0,02	29,14	6,08
TOTAL	-	-	1	0,032	59,06	12,32

Tabla 4.17. Coste del mortero aligerado con 40% de PET en volumen.

MORTERO DE 50% DE PET						
Producto	Precio por peso (€/tn)	Precio por volumen (€/m ³)	Porcentaje en la mezcla (%)	Coste en mezcla €/probeta	Coste en mezcla €/tn	Coste en mezcla €/m ³
Cemento	96,81	106,25	0,30	0,01	29,12	5,67
Arena	1,27	1,27	0,45	0,00	0,57	0,11
Agua	14,75	26,55	0,15	0,00	2,22	0,43
PET (triturado)	400	149,6	0,10	0,02	39,00	7,60
TOTAL	-	-	1	0,035	70,92	13,81

Tabla 4.18. Coste del mortero aligerado con 50% de PET en volumen.

Como reflejan los datos de costes de los morteros aligerados, el PET tiene un valor mas elevado y esto lleva a mezclas mas caras a medida que se añade mas porcentaje de residuo. Éste problema tiene su origen en que el comercio del PET triturado es reducido, y las opciones de conseguirlo de esta forma nos lleva a un encarecimiento del material. La utilización e incorporación del PET en la aplicación de aligerar morteros en el mercado podría conseguir el abaratamiento del producto si las empresas observan las posibles prestaciones.

Si a ello se cuenta con el problema medioambiental de la extracción de áridos del medio ambiente y la obligación de reciclar residuos plásticos, gobiernos e instituciones públicas deberían de ayudar y proporcionar subvenciones a aquellas

empresas que quieran utilizar este tipo de morteros, ya que se estarían desarrollando procesos industriales basados en la reutilización y el reciclaje.

Por último, en el estudio económico se ha tenido en cuenta únicamente el coste material de los morteros, el cual sería elevado, pero por otra parte, valorando los costes de mano de obra, transporte de materiales, gasto energético, beneficios de subvenciones e impuestos, el costo final de usar morteros aligerados se reduce considerablemente.

5. CONCLUSIONES

El polietilentereftalato (PET) es el plástico más utilizado en el mundo, a pesar de su posibilidad de reciclaje, sigue siendo un problema ambiental importante que resolver, pues no deja de ser un residuo que en gran medida acaba invadiendo espacios naturales. Una posible vía para la reutilización es la introducción del PET como materia prima en la fabricación de morteros ligeros. La utilización de materiales de construcción sostenibles se hace cada vez mas necesaria pues, desde un mismo acto, se reduce el vertido de contaminantes y residuos a la naturaleza y se reduce la cantidad de materia prima natural que se necesita extraer. A continuación, se exponen las principales conclusiones extraídas del estudio de morteros aligerados con PET, desde un 0%, hasta un 50% en volumen, en sustitución de la arena.

1. La densidad aparente de los morteros disminuye con el incremento del porcentaje añadido del residuo plástico. Esto es debido a que el PET presenta una densidad mas baja que la arena y su capacidad de compactación también es menor, lo cual genera una estructura interna mas porosa. El PET no actúa como acelerante de hidratación, pues las probetas de mayor tiempo de curado presenta mayor densidad aparente. El tiempo de curado no es un factor clave para la densidad aparente, pues la diferencia de esta propiedad física a ambos tiempos de curado no es notable.
2. La absorción de agua por capilaridad aumenta a medida que se añade mas cantidad de residuo plástico, ya que se genera un mortero menos compacto y con más poros internos. Si el tiempo de curado es mayor, el coeficiente de absorción disminuye, pues tras un largo periodo de curado y endurecimiento

se forman mas silicatos de calcio hidratados, que forman una red mas compacta.

3. La resistencia a flexión de los morteros aligerados disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de PET añadido. Presentando todos menor resistencia a flexión que el mortero de control. Las probetas con mayor tiempo de curado presentan unos valores de resistencia a flexión mayores, pero a pesar de ello, el plástico no consigue integrarse en la estructura interna de la pasta.
4. La resistencia a compresión también disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de PET en los morteros, . debido posiblemente a los poros e imperfecciones que genera el plástico internamente. El tiempo de curado no es determinante en el endurecimiento de las estructura, pues el plástico no se integra en la red.
5. El estudio económico revela que los morteros aligerados, a priori, resultan mas caros de fabricar que los convencionales. Pero habría de hacerse una valoración mucho mas amplia, pues una gran cantidad de empresas utilizando estos recursos generaría un abaratamiento del PET triturado. A parte, habría de sumar el beneficio y el ahorro en costos de extracción de áridos. El transporte, mano de obra y el ahorro energético también sería una fuente de ahorro, pues se manejan materiales mucho mas ligeros y fáciles de manipular. Por último, la disponibilidad de subvenciones y ayudas económicas al usar este tipo de materiales de construcción sostenibles serían un gran incentivo para que grandes empresas tomaran la iniciativa de estudiar la integración de estos residuos.

Bibliografía

- Abanto F., *Tecnología del concreto*, Lima, Perú (1997).
- Aitcin P. C. Cements of yesterday and today. Concrete of tomorrow, Cement & Concrete Research, 30 (2000) 1349-1359.
- Alfredo P., Hormigón armado, Ed. Reverté, pág. 124, (1986).
- Álvarez C. E., *Aplicación del cemento* (2010)
- Antonella C., *Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla*. Universidad Politecnica de Cataluña. Barcelona (2012).
- Bensted J, Barners P. *Structure and performance of cements*. 2^a ed. London: Applied Science (2002) 25-115.
- Bye G., *Pórtland cement: composition, production and properties*. 2^a ed. London: Thomas Telford (1999).
- Bournazel J., Malier Y., Moranville M., *Concrete, from Material to Structure* RILEM Publications (1988)
- Cassinello, F.996). *Construcción, hormigonería*. Madrid: Rueda. S.L., págs. 103-105
- Center for Recycling and Economic Development. PLAS-CRETE: *A Lightweight Pórtland Cement Concrete Product Manufactured From Discarded Mixed No. 3–7 Plastics*, Chelsea, Massachusetts, USA (2002).
- Chen P., Chung D., *A comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement by latex addition*. A review. ACI Mater J 93 (1996) pp. 129-133.
- Construmática, *Introducción a los morteros y Características de los morteros*. Recuperado de: <https://www.construmatica.com>

COTEC Centro de Información Técnica. Comisión Técnica. *Los plásticos en la construcción. Su contribución a la Salud del Medio Ambiente*. CIC. Primera Edición (2001).

Costa del Pozo A., *“Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla”*. Tesina de Maestría en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente UPC, España. Barcelona (2012).

Cowan H., *History of masonry and concrete domes in building construction*. Build Environ. ACI Journal, V. 50, No. 9, Mayo (1977). pp. 741-760.

Flores V., Rojas J., Torres R., *Mezclas de cemento y agregados de plástico para la construcción de viviendas ecológicas*. Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Bolivia (2014).

Gómez M., Carvajal A., *Edificaciones y comunidades sustentables*. Campo Grande, Universidad Federal de Mato Grosso do Sul. Edición digital. Brasil (2007).

Jeffery J., *The cristal structure of tricalcium silicate*. Acta Crystallographica 5 (1952).

Junco Petrement C. Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano. Obtención, caracterización y puesta en obra. Tesis Doctoral. Universidad de Burgos. 2012

IECA, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, Investigación: *Componentes y propiedades del cemento*. Recuperado de: <https://www.ieca.es/>

Locher F., *Cement principles of production and use*. Düsseldorf: Bau und Technik (2006).

Lamiah, *Historia del cemento* (28 de Enero de 2010). Recuperado de <https://lahmia.wordpress.com/>

Magariños O., Alderete C., Arias L., Lucca M., *Estudio de morteros que contienen escamas de plástico procedente de residuos post-industriales*. Instituto de Tecnología Arquitectónica (ITA), Argentina (1997).

Mariano O., *PET* (2009). Recuperado de
www.tecnologiadelosplasticos.blogspot.com

Mark H., Bikales N., Overberger C., Menges G., *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering* (1988).

Mingarro, F. *Prontuario del cemento*. Barcelona: Técnicos Asociados, S.A. (5ª Edición, traducción de la 6ª en versión alemana), págs. 123-133 (1985)

Moliné A., Pavini H., Pavini M., *Aprovechamiento de PET residual para la conformación de placas prefabricadas*. Taller de Edicilia I y II - CEPIA - FAPyD (2010).

Pantigoso J., et al, *Cemento Pórtland*, Perú (2015).

QuimiNet, *¿Cuáles son los plásticos más utilizados en la industria?* Recuperado de: www.quiminet.com (2003)

Sánchez D., *Tecnología del mortero y del concreto*. Quinta edición (2001).

Serrano J., *Otras aplicaciones en ingeniería civil* (2004).

Smith W., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Segunda ed. McGraw-Hill (1992).

Taylor J., Hinczak I., Matulis C., *Powder Diffraction*, (2000)

Taylor H., *Cement Chemistry*. 2ª ed. London: Thomas Telford, (1997).

Taylor H., *La química de los cementos*. Traducido por Romero, F., Fernández J., Bilbao: Urmo (1978).

Tejela J., *Pavimentos de seguridad, deportivos y otras aplicaciones* (2004).

Triviño F., *Materiales de construcción Vol.24*, I.E.Tc.c., España (1974)

UCML, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, Investigación: *Morteros*. Recuperado de: <https://previa.uclm.es>

Walter H., *Manual Tecnológico Del Cemento*, Primera Edición, Editores Técnicos Asociados, Barcelona, (1977).

Ylmén R., Jäglid U., Steenari B.M., Panas I. *Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques. Cement and Concrete Research*, 39 (2009) 433-439.

Zúñiga A., *Evaluación del tereftalato de polietileno (PET) como agregado en la elaboración de mortero para ladrillos y concreto*. Universidad de La Salle. Bogotá D.C. (2015).

NORMATIVA:

DIN EN 196-1. Métodos de ensayo del cemento - Parte 1: Determinación de la fuerza

ISO 468. Rugosidad superficial. Parámetro, sus valores y las reglas generales para la determinación de las especificaciones.

EN ISO 6507-1. Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo.

UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.

UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

UNE-EN 459-1:2011. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

UNE-EN 998-1:2010. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido.

UNE-EN 998-2:2012. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería

UNE-EN 1015-2. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para el ensayo.

UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)

UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.

UNE-EN 12004:2008. Adhesivos para baldosas cerámicas. Requisitos, evaluación de la conformidad, clasificación y designación.

UNE-EN 13813:2014. Mortero para recrecidos y acabados de suelos. Propiedades y requisitos.

PÁGINAS WEBS:

<https://www.quotatis.es/consejos-reformas/preguntas-frecuentes/albanileria-carpinteria-y-puertas/la-diferencia-cemento-mortero/>

<http://www.arqhys.com/arquitectura/industrias-cemento.html>

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

<http://www.pladesemapesga.com/descargas/anexonotadeprensa-efectos-ambientales-del%20clinker.pdf>

<http://www.ecorfan.org/bolivia/handbooks/ciencias%20tecnologicas%20I/Articulo%207.pdf>

<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/477/525>

http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/18684/41071097_2015.pdf?sequence=1

https://www.construmatica.com/construpedia/Morteros_en_el_CTE_y_Marcado_CE._Fichas_Informativas

https://www.construmatica.com/construpedia/Morteros_para_Alba%C3%B1iler%C3%ADa._UNE-EN_998-2

http://www.preoc.es/download/ADS/D13DD080/designaci%C3%B3n%20de%20morteros.pdf?cookie_check=1

https://www.construmatica.com/construpedia/Morteros_de_Alba%C3%B1iler%C3%ADa#Selecci.C3.B3n_de_los_morteros_de_alba.C3.B1iler.C3.ÁDa_seg.C3.BAñ_su_aplicaci.C3.B3n

<https://www.cymper.com/blog/apuntes-sobre-la-nomenclatura-y-propiedades-de-los-morteros-de-construccion/>

http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1935&catid=313:normas-de-calidad&Itemid=100092

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5694/Caracterizaci%C3%B3n%20f%C3%ADsica.pdf?sequence=1>

<https://civilgeeks.com/2011/09/30/microestructura-del-cemento/>

<https://www.quiminet.com/articulos/cuales-son-los-plasticos-mas-utilizados-en-la-industria-11.html>

<https://www.lavanguardia.com/natural/20170430/422038159271/arena-mergencia-medioambiental.html>

Índice de tablas.

Tabla 1.1 Tipos de morteros de cemento y arena. Fuente: UCLM., (www.ingenieriarural.com)	9
Tabla 1.2. Principales compuestos del cemento Pórtland.....	12
Tabla 1.3. Características de los tipos de xilenos.	18
Tabla 3.1. Especificaciones del cemento Pórtland CEM II.....	25
Tabla 3.2. Especificaciones del cemento Pórtland.....	26
Tabla 3.3. Composición de las probetas.....	36
Tabla 3.4. Requisitos para las máquinas de ensayo mecánico. Fuente: Norma UNE-EN 1015-11:1999.	49
Tabla 4.1. Valores de Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa	55
Tabla 4.2. Porcentaje de partículas CP.	56
Tabla 4.3. Analisis elemental (CNHS-O) del CP.	57
Tabla 4.4. Composición química del CP.....	58
Tabla 4.5. Características técnicas del PET. Fuente: Industria del Plástico. Richardson & Lokensgard.	61
Tabla 4.6. Resultados del ensayo de densidad aparente.	62
Tabla 4.7. Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.	65
Tabla 4.8. Resultados del ensayo de resistencia a compresión.....	69
Tabla 4.9. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la (7 días).	76
Tabla 4.10. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la compresión (28 días).	77
Tabla 4.11. Especificaciones de morteros para albañilería. Norma UNE-EN 998-2.....	78
Tabla 4.12. Clasificación de las propiedades del mortero endurecido.	79
Tabla 4.13. Coste del mortero aligerado con 0% de PET en volumen.	89
Tabla 4.14. Coste del mortero aligerado con 10% de PET en volumen.	90
Tabla 4.15. Coste del mortero aligerado con 20% de PET en volumen.	90
Tabla 4.16. Coste del mortero aligerado con 30% de PET en volumen.	90
Tabla 4.17. Coste del mortero aligerado con 40% de PET en volumen.	91
Tabla 4.18. Coste del mortero aligerado con 50% de PET en volumen.	91

Índice de figuras.

Figura 1.1. Esquema de esterificación y policondensación del PET.	19
Figura 3.1. Desarrollo de resistencias en el cemento con los días.	26
Figura 3.2. Arena normalizada CEN-NORMSAND.	27
Figura 3.3. Molino de cuchillas WSGM-250.	28
Figura 3.4. PET triturado en forma de escamas.	28
Figura 3.5. pH-metro de sólidos PCE-PH20S, "PCE Instrument".....	30
Figura 3.6. Espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva y generación de rayos X.	32
Figura 3.7. Analizador de granulometría Malvern-Mastersizer 2.000.....	33
Figura 3.8. Analizador elemental CHNS-O ThermoFinnigan Flash EA 1112.	34
Figura 3.9. Mezcladora planetaria Proeti.	37
Figura 3.10. Preparado de los componentes de la mezcla.	37
Figura 3.11. Enmoldado de las probetas.	38
Figura 3.12. Probetas tras 24h en el molde.	39
Figura 3.13. Probetas desmoldadas y etiquetadas.	39
Figura 3.14. Cámara de humedad.	40
Figura 3.15. Balanza con estribo.	41
Figura 3.16. Probetas sumergidas en agua.	42
Figura 3.17. Estufa ventilada.	44
Figura 3.18. Cera de parafina.	45
Figura 3.19. Colocación de probetas del ensayo. Fuente: Norma UNE-EN 1015-18. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, Parte 18.	45
Figura 3.20. Probetas durante el ensayo de absorción de agua por capilaridad.	46
Figura 3.21. Ensayo de resistencia a flexión. Fuente: Norma UNE-EN 1015-11:1999.	48
Figura 3.22. Ensayo de resistencia a flexión II.	48
Figura 3.23. Probetas tras el ensayo de flexión.	50
Figura 3.24. Máquina para el ensayo de compresión. Modelo: 810 MTS.	52
Figura 3.25. Adaptador para el ensayo de compresión.	53
Figura 3.26. Probeta tras en ensayo de compresión.	54
Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula del cemento Pórtland.	56
Figura 4.2. DRX del CP.	59
Figura 4.3. Espectros del estudio del CP.	60
Figura 4.4. Resultados del ensayo de densidad aparente.	62
Figura 4.5. Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.	66
Figura 4.6. Resultados del ensayo de resistencia a flexión.	68
Figura 4.7. Resultados del ensayo de resistencia a compresión.	71
Figura 4.8. Comparación de resistencia a la flexión y densidad aparente (7 días).	72
Figura 4.9. Comparación de resistencia a la flexión y densidad aparente (28 días).	73
Figura 4.10. Comparación de resistencia a la compresión y densidad aparente (7 días).	74
Figura 4.11. Comparación de resistencia a la compresión y densidad aparente (28 días).	75
Figura 4.12. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a compresión (7 días).	76
Figura 4.13. Cociente entre resistencia a flexión y resistencia a la compresión (28 días).	77
Figura 4.14. Prescripciones para revestimientos continuos.	82
Figura 4.15. Prescripciones para revestimientos continuos II.	83
Figura 4.16. Prescripciones para revestimientos continuos III.	84
Figura 4.17. Prescripciones para morteros de juntas.	85

Figura 4.18. Prescripciones para morteros de juntas II.....	86
---	----