



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS ALIGERADOS CON RESIDUOS DE PODA DE OLIVO

Alumno: Marina Oya Monzó

Tutor: M^a Dolores La Rubia García
Dolores Eliche Quesada

Dpto: Ingeniería Química, Ambiental y de los
Materiales

Septiembre, 2017



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

Doña MARÍA DOLORES LA RUBIA GARCÍA y Doña DOLORES ELICHE QUESADA, tutoras del Trabajo Fin de Grado titulado: CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS ALIGERADOS CON RESIDUOS DE PODA DE OLIVO, que presenta MARINA OYA MONZÓ, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2017

La alumna:

Las tutoras:

MARINA OYA MONZÓ

MARIA DOLORES
LA RUBIA GARCÍA

DOLORES ELICHE
QUESADA

RESUMEN

Con el fin de reducir el consumo de energía en los edificios, en este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se propone la fabricación de materiales de construcción innovadores y más ligeros. Una de las formas de aligerar los materiales de construcción es mediante la incorporación de residuos agrícolas, lo que supone una gran rentabilidad. El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es estudiar la valorización del uso de poda de oliva triturada como sustitutivo parcial del agregado arena en la fabricación de morteros sostenibles.

Se ha evaluado la adición de diferentes porcentajes de sustitución de arena: 0, 10, 25 y 50 % en volumen por poda de olivo para un tiempo de curado de 7 y 28 días. Así como la influencia de someter la poda de olivo a un pretratamiento químico consistente en la saturación de la biomasa con una solución acuosa al 10 % de hidróxido de calcio para obtener una mineralización del residuo vegetal antes de la adicción a la mezcla de mortero.

Los morteros con incorporaciones de poda de olivo se han caracterizado mediante la contracción volumétrica, densidad aparente y absorción de agua por capilaridad. El comportamiento mecánico se ha evaluado mediante ensayos resistencia a compresión y a flexión. La adición de poda de olivo produce una disminución en la densidad aparente e incrementa la porosidad de los morteros. El pretratamiento de la biomasa con la solución acuosa de hidróxido cálcico es efectivo para la mineralización de la madera dando lugar a morteros con propiedades físicas y mecánicas superiores a las de los morteros que no son pretratados. Los resultados obtenidos muestran que la adición del 10 % en volumen de poda de olivo pretratada con la solución de hidróxido cálcico produce morteros más ligeros que el mortero control, con propiedades mecánicas similares. La adición de mayores cantidad de poda pretratada produce un detrimento más pronunciado en las propiedades mecánicas. No obstante, todos los morteros, excepto los que incorporan un 50% de poda sin tratamiento, cumplen la norma UNE-EN 998-1:2010 de propiedades físicas y mecánicas mínimas requeridas para morteros.

ABSTRACT

In order to reduce the energy use, this end-of-degree project poses the fabrication of innovative construction materials which are lighter than the ones currently used. The use of these mortars aims at the improvement of insulating qualities, which would mean a major contribution to energy saving. There are many ways to lighten construction materials depending on the commissioning work requested. The possibility of using agricultural waste shows high profitability. This project will examine the possible benefits of using grinded olive tree pruning as a partial substitute for the standard sand used in the manufacture of concrete mortars.

The cement matrixes used in this project are made of a substitution of 0, 10, 25 and 50 % of volume of waste for a curing time of 7 and 28 days. In addition, the performance of the pruning will be evaluated after applying a chemical treatment consisting in the saturation of the biomass in a calcium hydroxide watery dissolution of 10 % in order to obtain mineralization of the plant waste before adding it to the mortar mix.

Mortars with olive tree pruning are tested by their volumetric shrinkage, bulk density and capillary absorption of water. Besides that, the mechanical behavior has been evaluated by compression and bending test. The addition of this by-product has both decreased the bulk density and increased the porosity of mortars.

The best results were achieved when adding grinded olive tree pruning under treatment, due to its similarity with the control mortar in terms of physical and mechanical performance. The optimal substitution percentage was 10 % with treatment, although every mortar studied in this project - save those with 50 % substitution without treatment - meet the requirements for Norma UNE-EN 998-1:2010 concerning the minimum physical and mechanical properties for mortars.

Tabla de contenido

1. ANTECEDENTES	8
1.1. Mortero de cemento	8
1.2. Cemento Portland	8
1.2.1. Proceso de fabricación del cemento Portland	9
1.2.2. Composición química del cemento Portland.....	10
1.2.3. Tipos de cemento Portland	14
1.3. Áridos.....	15
1.3.1. Producción de áridos.....	16
1.3.2. Tamaño de árido	16
1.3.3. Designación y descripción de árido	17
1.3.4. Clasificación de los áridos por su tamaño	18
1.3.5. Arena normalizada CEN.....	18
1.4. Agua	19
1.4.1. Tipos de agua de mortero.....	19
1.5. Aditivos	20
1.5.1. Tipos de aditivos	20
1.5.2. Requisitos de los aditivos.....	21
1.6. La biomasa del olivar	22
1.6.1. Uso de residuos de biomasa en la fabricación de morteros.....	24
2. OBJETIVOS.....	26
3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. Materiales	27
3.2. Procesos de caracterización de las materias primas	29
3.2.1. Humedad y materia volátil	29
3.2.2. Determinación de la densidad relativa y superficie específica	29
3.2.3. Distribución granulométrica	30
3.2.4. Análisis elemental (CHNS-O)	30
3.2.5. Fluorescencia de rayos X (FRX)	30
3.2.6. Caracterización mineralógica (DRX)	30
3.2.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	31
3.2.8. Determinación del contenido en lignina.....	32
3.2.9. Contenido en celulosa y hemicelulosa	32
3.2.10. Análisis vibracional (FT-IR)	32
3.3. Elaboración de probetas de mortero	33

3.3.1. Requisitos para la fabricación de morteros	33
3.3.2. Proceso de fabricación de las probetas de mortero.....	34
3.4. Ensayos físicos	38
3.4.1. Determinación de la densidad aparente	38
3.4.2. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad	40
3.5. Ensayos de resistencias mecánicas.....	42
3.5.1. Resistencia a flexión.....	42
3.5.2. Resistencia a compresión	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Caracterización de las materias primas.....	44
4.2.1. Caracterización del cemento Portland	44
4.2.2. Caracterización de las fibras de poda de olivo	50
4.3. Composición de las mezclas	54
4.4. Caracterización de morteros	56
4.4.1. Variación dimensional	56
4.4.2. Absorción de agua por capilaridad	58
4.4.3. Densidad aparente.....	60
4.4.4. Resistencia a Flexión	62
4.4.5. Resistencia a Compresión	65
4.4.6. Microscopía esteroscópica.....	68
4.5. Estudio económico	69
5. CONCLUSIONES.....	71
6. BIBLIOGRAFÍA	73

Índice de tablas

Tabla 1.1. Composición química del Clínter.....	11
Tabla 1.2. Límites en masa que pasa, expresado en porcentaje	17
Tabla 1.3. Clasificación específica de materiales	18
Tabla 1.4. Distribución granulométrica de la arena.....	19
Tabla 4.1. Valores característicos del cemento Portland	45
Tabla 4.2. Distribución del tamaño de partícula del cemento Portland.....	46
Tabla 4.3. Análisis elemental (CNHS-O) de los residuos.....	47
Tabla 4.4. Composición química del cemento Portland	48
Tabla 4.5. Caracterización de las fibras de poda de olivo	51
Tabla 4.6. Posiciones y asignaciones de las fibras vegetales.....	52
Tabla 4.7. Peso de los componentes equivalente a los porcentajes en volumen.....	54
Tabla 4.8. Contracción volumétrica en tanto por ciento	56
Tabla 4.9. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad	58
Tabla 4.10. Densidad aparente de las probetas ensayadas	60
Tabla 4.11. Medias de resistencia a flexión de las probetas.....	62
Tabla 4.12. Medias de resistencia a compresión de las probetas.....	65
Tabla 4.13. Coste de los componentes del cemento	69
Tabla 4.14. Coste por metro cúbico de mortero control	70
Tabla 4.15. Coste por metro cúbico de mortero con 10% de poda de olivo	70
Tabla 4.16. Coste por metro cúbico de mortero con 25% de poda de olivo	70
Tabla 4.17. Coste por metro cúbico de mortero con 50% de poda de olivo	71

Índice de tablas

Figura 3.1. Trituradora AEG	28
Figura 3.2. Rodillo de trituración al finalizar el proceso.....	28
Figura 3.3. Equipo de microscopía electrónica de barrido	31
Figura 3.4. Espectrómetro FT-IR	33
Figura 3.5. Mezcla fresca	35
Figura 3.6. Amasadora empleada	36
Figura 3.7. Moldes con morteros en proceso de fraguado.....	37
Figura 3.8. Probetas sumergidas en acetona	38
Figura 3.9. Probetas en agua	39
Figura 3.10. Peso de una probeta	39
Figura 3.11. Probeta en balanza hidrostática	40
Figura 3.12. Ensayo de capilaridad	41
Figura 3.13. Bandeja cubierta para evitar evaporación.....	41
Figura 3.14. Máquina para ensayo de flexión	42
Figura 3.15. Máquina de resistencia a la compresión del laboratorio.....	44
Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula del cemento portland.....	46
Figura 4.2. DRX del cemento Portland	49
Figura 4.3. Imágenes SEM-EDAX del CP (4.5 Kx)	50
Figura 4.4. (a) Poda sin tratamiento previo, (b) Detalle de fibra de madera,	51
Figura 4.5. Espectros FTIR de la madera, poda y hoja de olivo.....	52
Figura 4.6. Espectros FTIR de la poda sin tratamiento	53
Figura 4.7. Poda saturada en agua	55
Figura 4.8. Poda saturada con tratamiento.....	55
Figura 4.9. Contracción volumétrica en probetas de 7 días de curado	57
Figura 4.10. Contracción volumétrica en probetas de 28 días de curado	57
Figura 4.11. Absorción por capilaridad en probetas de 7 días de curado	59
Figura 4.12. Absorción por capilaridad en probetas de 28 días de curado	59

1. ANTECEDENTES

1.1. Mortero de cemento

El mortero es un material de construcción que se obtiene mezclando un material conglomerante (cemento Portland u otros cementantes), con arena y agua en la cantidad adecuada. Es un material con gran trabajabilidad y resistencia que se aprovecha para diversos usos en la rama de la construcción, tales como recubrimiento y nivelación de suelos, de muros, relleno, pega de juntas, etc.

Su característica más importante es la su resistencia a la compresión, que depende de los materiales empleados y las correspondientes dosificaciones, del procedimiento al ser mezclados, la eficiencia de compactación, la humedad, la temperatura y el tiempo de curado (Bye, 1999).

La resistencia del mortero depende de la cantidad de cemento y de la relación agua-cemento, es decir, al añadir materiales de relleno, como la arena o aire, se reduce su resistencia a la compresión. Otras características interesantes son la buena adherencia, trabajabilidad y retención de agua.

Los morteros tienen la capacidad de endurecer en un medio hidráulico, gracias a las reacciones de sílice y alúmina producidas en el cemento que le proporcionan resistencia. Los morteros que endurecen en un ambiente aéreo fraguan muy despacio por el proceso de carbonatación.

1.2. Cemento Portland

En el año 1824, un albañil británico, Joseph Aspdín, consiguió fabricar un material que consiguió la Patente Británica BP 5022 titulada *Una Innovación en el Modo de Producir una Piedra Artificial*, la cual designó con el término "Cemento Portland".

El cemento Portland es un conglomerante o cemento hidráulico, es decir, fragua y endurece a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, formando productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto en agua como en aire, formando un material con buenas propiedades aglutinantes.

Este endurecimiento hidráulico es el resultado de la reacción del agua con los constituyentes del cemento, debido principalmente a la presencia de silicatos cálcicos hidratados, aunque también pueden participar en el proceso los aluminatos. La propiedad de conglomerante hidráulico le ha llevado a ser considerado un material básico en la construcción.

El cemento conforme a la norma europea UNE-EN 197-1:2011 (UNE-EN 197-1, 2011), designado cemento CEM, debe tener la capacidad de producir un hormigón o un mortero que mantenga su trabajabilidad durante un tiempo suficiente, además de alcanzar los niveles específicos de resistencia después de unos periodos de tiempo concretos. Para que cumpla estas condiciones, debe dosificarse y mezclarse apropiadamente con áridos y agua. También debe tener estabilidad de volumen a largo plazo.

1.2.1. Proceso de fabricación del cemento Portland

El proceso de fabricación del cemento Portland consta de las siguientes etapas:

- Extracción de las materias primas: consiste en la extracción de piedras calizas y arcillas. Estos materiales se extraen mediante perforación y voladura de una cantera, para sufrir un proceso previo de trituración para transportarlo a la fábrica.
- Preparación y clasificación de las materias primas: el material sufre un primer proceso de homogeneización en grandes pilas formadas por capas, siendo cortadas en sentido transversal.

La materia prima debe tener algunas características específicas para la fabricación del clínker, su tamaño debe reducirse hasta oscilar entre los 5 y 10 milímetros, además de tener un porcentaje determinado de los óxidos que la componen: óxido de calcio (44%), óxido de silicio (14,5%), óxido de aluminio (3,5%), óxidos de hierro (3%) y óxidos de magnesio (1,6%).

Las calizas serán las encargadas de aportar el CaO que reaccionará en el horno para formar los silicatos (que son los componentes realmente activos de la mezcla).

Las arcillas son las encargadas de aportar los óxidos que funcionan como fundentes y facilitan las reacciones químicas que se producen en el horno contribuyendo a la formación de la fase líquida.

- Homogeneización: consiste en mezclar las calizas y arcillas trituradas, mediante el transporte de bandas o molinos, generalmente verticales, para reducir su tamaño mediante el proceso de molienda.
- Este proceso es esencial debido a la importancia de obtener un material con composición homogénea para la obtención del clínker.
- Cocción en horno rotativo: el crudo es introducido a través de un intercambiador de calor que aprovecha los gases que salen del horno para alcanzar una temperatura de 600°C. Una vez en el horno, se requiere que el material alcance una temperatura de 1500°C para que se produzcan las reacciones químicas que generen los componentes básicos del clínker que le aportan sus propiedades.
- Enfriamiento: a la salida del horno, el clínker debe sufrir un rápido enfriamiento para evitar que se reviertan las reacciones químicas producidas en el horno. El aire empleado en la refrigeración se aprovechará en el proceso de combustión.
- Molienda del cemento y adiciones: en esta etapa el clínker se mezcla con yeso, para retardar el tiempo de fraguado, y las posibles adiciones, para después proceder a la molienda en los molinos de bolas. Una vez conseguida la finura requerida, el producto obtenido recibe el nombre de cemento Portland.
- Almacenamiento y transporte: el cemento se almacena en distintos silos, protegido de condiciones ambientales.

1.2.2. Composición química del cemento Portland

La norma europea UNE-EN 197-1:2011 (UNE-EN 17-1, 2011) recoge los componentes que en la actualidad pueden formar parte de un cemento Portland. Los

requisitos de estos componentes se determinan mediante los métodos de ensayo recogidos en la normas UNE-EN 196 (UNE-EN 196, 2005).

Los cementos CEM están constituidos por diferentes materiales, siendo estadísticamente homogéneos como consecuencia de la calidad asegurada en la producción y manipulación del material, calidad establecida en la Norma EN 197-2 (UNE-EN 197-2, 2014).

1.2.2.1. Clínker de cemento Portland

El clínker de cemento Portland se obtiene por sinterización de una mezcla concreta de materias primas, conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos. Es un material hidráulico que debe estar constituido como mínimo en dos tercios de su masa por silicatos de calcio $[3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2]$ y $[2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2]$, mientras que el contenido de óxido de magnesio (MgO) no debe exceder el 5% en masa [UNE-EN 197-1:2011].

La composición química del clínker se expresa en porcentaje másico en la Tabla 1.1.

Fase	Fórmula de óxidos	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	40-60	50
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	15-30	23
Ferritoaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	5-15	10
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	6-18	12
Cal libre	CaO	0,1-4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	0,7-1,5	1,5

Tabla 1.1. Composición química del Clínker

Los silicatos tricálcico y dicálcico son los componentes más importantes ya que son los causantes del endurecimiento de la pasta de cemento hidratado.

El silicato tricálcico o alita determina de modo determinante la mayoría de las propiedades del cemento. Este componente le aporta las propiedades de endurecer rápido, debido a su alta velocidad de hidratación (fraguado), y alcanzar una

resistencia alta, mediante los procesos de molido y mezclado con agua hasta la obtención de una pasta. Este componente se forma por la reacción en estado sólido del óxido de calcio con la sílice, aunque también puede producirse a partir de caliza pura y cuarzo. La desventaja que presenta es la formación de cantidades de cal y de alteraciones en el volumen causadas por la dilatación térmica producida por el calor de hidratación, ya que es un componente con una gran capacidad exotérmica.

A pesar de que el silicato tricálcico es el componente más abundante en el cemento, se suelen evitar cementos con altos contenidos, ya que provocan la aparición de fisuras por los cambios de volumen. La estabilidad de los cementos con alto contenido de silicato tricálcico es menor debido a que generan una mayor cantidad de sales, que son atacadas fácilmente por los agentes atmosféricos.

El silicato dicálcico o belita se produce cuando el clínker de cemento no está totalmente saturado de óxido de calcio. Es el mineral que se caracteriza por aportar resistencia a medio y largo plazo al cemento, debido a que tiene una velocidad de hidratación más lenta que la del silicato tricálcico. Los cementos con un elevado contenido de este compuesto se denominan como "cementos fríos", debido a que son menos exotérmicos en la hidratación.

La existencia de mayor cantidad de óxido de hierro en la cocción del cemento ayuda a disminuir los valores del aluminato tricálcico, pero trae consigo la formación de ferroaluminato cálcico. Este componente no contribuye mucho al endurecimiento hidráulico, pero es necesario para trabajar como fundente y disminuir la temperatura de formación del clínker. Este mineral es el responsable del color grisáceo del cemento, por lo que si faltara este componente el cemento sería blanco.

El aluminato tricálcico reacciona rápidamente con el agua, pero tiene escasas propiedades hidráulicas, ya que se hidrata con mayor rapidez, proporcionando una mayor velocidad de fraguado mejorando la resistencia inicial del cemento. El aluminato tricálcico contiene el óxido de aluminio que no se combina con el aluminoferrito cálcico, liberando en su fundición óxido de calcio. Su presencia debe ser limitada debida a que su presencia provoca debilidad frente a los sulfatos.

La cal libre y la periclasa (MgO) son componentes minoritarios en el clínker, ya que estos componentes reaccionan con el agua para formar los hidróxidos cálcico y de magnesio, que ocupan mayor espacio que los óxidos iniciales, provocando expansiones dañinas. Es por este motivo que las normas del cemento limitan los contenidos de CaO y MgO libres.

1.2.2.2. Sulfato de calcio

El yeso es el sulfato más común, siendo su principal uso la fabricación de escayola, aunque también se emplea sin calcinar como retardador en el cemento Portland.

El yeso es un mineral corriente y frecuente en las rocas sedimentarias, con frecuencia aparece intercalado en calizas y pizarras. También es muy común en capas situadas bajo los depósitos de sal, debido a que es uno de los primeros minerales depositados que cristalizan por la evaporación de las aguas salinas. es común en regiones volcánicas, especialmente si las calizas han sufrido las acciones de los vapores sulfurosos. Aparece mezclado con diversos minerales, siendo los más corrientes la halita, anhidrita, calcita, azufre, dolomita, cuarzo y piritita (Klein, 1997).

También puede producirse de forma sintética mediante los subproductos de la desulfuración de gases de combustión de las plantas de carbón alimentado.

Aunque la cantidad de yeso empleada en la mezcla representa un pequeño porcentaje de volumen, apenas el 2-3% del peso de los materiales secos, tiene funciones importantes. La adicción del yeso no debe superar esta cifra, debido a que en proporciones mayores produce un incremento de volumen dentro del cemento fraguado produciendo fisuras (Taylor, 1997).

Su función principal es retardar el fraguado inicial del cemento, ya que sin su presencia, el clínker fragua instantáneamente. Esto se debe a que el aluminato tricálcico, en presencia del yeso, no se hidrata de manera inmediata, sino que reacciona con el yeso produciendo sulfoaluminato (doble sal cristalina), por lo que se

mantiene la concentración de aluminato tricálcico por debajo de la necesaria para que se separen sus hidratos cristalinos.

1.2.2.3. Hidratación del mortero

El fraguado y endurecimiento del mortero depende de las reacciones químicas que se producen al mezclar el cemento Portland con agua. La complejidad de este proceso es muy elevada, por la enorme cantidad de compuestos que forman el cemento.

La hidratación del mortero es un proceso químico por el cual el cemento adquiere dureza pétreo, y sucede después de la solidificación y pérdida de la plasticidad inicial que se produce en el mortero por la desecación y cristalización. Las reacciones de hidratación son altamente exotérmicas, provocando el calentamiento de la mezcla. El calor se desarrolla rápidamente durante el fraguado y parte del endurecimiento, disminuyendo progresivamente al hacerse más lenta la hidratación, hasta que finalmente se estabiliza.

El aporte de calor es debido a los procesos de hidratación de los distintos constituyentes que participan en la hidratación del cemento. En las primeras horas se producen variaciones de temperatura importantes que pueden causar retracciones, con la posible aparición de grietas debido a su variación volumétrica.

La relación entre la cal, que actúa como base, y los óxidos, que actúan como radicales ácidos, es una característica fundamental en un cemento, y se le conoce como módulo o índice hidráulico. Si un cemento posee un índice hidráulico inferior a 1,7, no pertenece al tipo Portland. Sin embargo, si es superior a 2,5 existirá un exceso de cal y aparecerán grietas.

1.2.3. Tipos de cemento Portland

Existe una gran variedad de tipos de cementos, que se distinguen según los requisitos químicos y físicos. Según la norma ASTM C150 / C150M-17 (ASTM C150 M-17, 2017), hay 8 tipos de cementos Portland.

Cemento hidráulico mezclado:

- **Tipo IS** - Cemento Portland con escoria de alto horno
- **Tipo IP** - Cemento Portland con adición puzolánica
- **Tipo P** - Cemento Portland con puzolana cuando no se requiere alta resistencia inicial
- **Tipo I (PM)** - Cemento Portland con puzolana modificado
- **Tipo II (SM)** - Cemento Portland con escoria modificada
- **Tipo S** - Cemento con escoria para la combinación con cemento Portland en la fabricación de hormigón y en combinación con cal hidratada en la fabricación del mortero de albañilería

Para cementos para mampostería se encuentra en la norma ASTM C91 / C91-M12, (ASTM C91 / C91-M12, 2012): N, M, S.

1.3. Áridos

El árido es un material granular inerte formado por fragmentos de roca empleado como materia prima en la construcción y numerosas aplicaciones industriales, debido a que se caracteriza por su estabilidad química y su resistencia mecánica.

Los áridos pueden ser naturales, artificiales o reciclados. El árido natural es de origen mineral, realizándose su obtención mediante procesos exclusivamente mecánicos. El árido artificial es un árido de origen mineral que se ha obtenido mediante un proceso industrial que contempla alguna modificación térmica. El árido artificial es el resultante del tratamiento de material inorgánico que ha tenido un uso en la rama de la construcción (UNE-EN 13139, 2003).

Gran parte de las características y propiedades del mortero dependen de las de los áridos que lo forman, las cuales deben ser estudiadas. El papel de los áridos en el mortero es muy importante, ya su función es permanecer estable en la mezcla sin modificar sus características, para lo cual no deben reaccionar con el cemento. Los áridos cumplen tres funciones elementales: disminuir las retracciones propias de la pasta del cemento, abaratar el costo del producto al ser un material más barato que

el cemento y aumentar las resistencias mecánicas, abrasión y durabilidad del mortero.

1.3.1. Producción de áridos

La producción de áridos consiste en la trituración y clasificación de rocas, aunque en la práctica es un proceso que se complica debido a la necesidad de obtener áridos homogéneos y de tamaños normalizados.

El proceso de producción de áridos pasa normalmente por una serie de etapas características:

- Eliminación de cubiertas vegetales, estériles y rocas alteradas.
- Extracción de los materiales (generalmente por explosivos).
- Transporte a la planta de tratamiento
- Tratamiento de los áridos (trituración, clasificación, limpieza).
- Almacenamiento y envío.

Como toda acción extractiva, está condicionada por factores geológico-mineros, además de no admitir grandes distancias a los centros de consumo por el incremento en el precio del transporte.

La contaminación atmosférica de la actividad minera tiene su origen en la combustión de la maquinaria, en el proceso de extracción mediante la mezcla explosiva de metano con aire y la emisión por voladuras. El mayor inconveniente de la actividad minera teniendo en cuenta el terreno, podría ser la desertización producida: deforestación, erosión y la pérdida del suelo fértil, además de la modificación del terreno que provoca un impacto visual.

1.3.2. Tamaño de árido

La descripción del árido se expresa en función de los tamaños de los tamices inferior (d) y superior (D), y a esto se le conoce como el tamaño de árido. Todos los áridos se deben describir en términos de tamaños del árido empleando la designación d/D , excepto en los casos del polvo, que es el árido cuya mayor parte

pasa por el tamiz de 0,063 mm, que deben ser descritos como relleno del árido. Los áridos más comunes suelen ser: 0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm y 2/8 mm.

Los límites para los tamaños superiores e inferiores deben estar conforme a los datos que se incluyen en la Tabla 1.2, excepto cuando tenga usos especiales que especifiquen otros límites.

Tamaño de los áridos Mm	Límites en porcentaje, en masa, que pasa				
	Límites superiores			Límites inferiores	
	2 D	1,4 D	D	D	0,5 d
0/1	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/2	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/4	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/8	100	98 a 100	90 a 99	-	-
2/4	100	95 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
2/8	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 20

Tabla 1.2. Límites en masa que pasa, expresado en porcentaje

Los requisitos requeridos para controlar la variabilidad de los áridos finos se limita a que dentro de un sistema de control continuo de producción en la fábrica, al menos el 90% de los 20 últimos resultados de la granulometría debe estar comprendida dentro de las tolerancias apropiadas (EN 13139, 2002).

1.3.3. Designación y descripción de árido

Los áridos, según la norma EN 13139:2002 (EN 13139, 2002), se deben designar de la siguiente manera:

- i) Origen, es decir, nombre de la mina o cantera (si no se sabe, se pone el nombre del depósito)
- ii) Tipo de árido, cualquier dato petrográfico, origen geológico o nombre comercial.
- iii) Número de esta norma europea
- iv) Tamaño del árido, con la nomenclatura anteriormente mencionada
- v) Cualquier información adicional necesaria para identificar el árido

1.3.4. Clasificación de los áridos por su tamaño

La forma más general de clasificar los áridos es según su tamaño, que varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros de sección transversal. Esta distribución del tamaño de las partículas es lo que se conoce con el nombre de granulometría.

Una clasificación específica del material se muestra en la Tabla 1.3, donde se indican los nombres más usuales de las fracciones.

Denominación		Tamaño de las partículas en mm
Árido Grueso	Arcilla	Inferior a 0,002
	Limo	Entre 0,002 - 0,063
Árido fino	Arena	Entre 0,063 - 2
Polvos minerales	Gravilla	Entre 2 - 19,1
	Grava	Entre 19,1 - 50,8
	Piedra	Entre 50,8 - 152,4

Tabla 1.3. Clasificación específica de materiales

1.3.5. Arena normalizada CEN

Según la norma EN 196-1:2005 (EN 196-1, 2005), para determinar la resistencia del cemento, se deben emplear arenas normalizadas CEN EN 196-1, que se emplean de referencia. Es una arena natural, silíceas, de granos redondeados y con un contenido en sílice al menos del 98%.

Su distribución granulométrica está comprendida entre los límites definidos en la Tabla 1.4.

Dimensiones malla cuadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Residuo acumulado sobre tamices (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Tabla 1.4. Distribución granulométrica de la arena

1.4. Agua

El agua tiene un papel muy importante en las reacciones del cemento durante el estado plástico, el proceso de fraguado y endurecimiento de un mortero.

1.4.1. Tipos de agua de mortero

En el empleo para fabricación de mortero, el agua se clasifica en agua de mezclado y agua de curado.

1.4.1.1. Agua de mezclado

El agua de mezclado es la cantidad de agua por volumen unitario de mortero que requiere el cemento para obtener una consistencia requerida de la pasta

El agua de hidratación forma parte del agua de mezclado, es aquella que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar parte de la fase sólida, también llamada no evaporable.

El agua restante que existe en la mezcla, es agua que se evapora a 0% de humedad relativa del ambiente y 110 ° C de temperatura, pero no se encuentra totalmente libre. Debido a la atracción molecular de la pasta de cemento sobre el agua evaporable, se observa que puede estar en tres condiciones distintas: agua de absorción (capa molecular que se adhiere a la superficie del cemento por fuerzas intermoleculares de atracción), agua capilar (agua que ocupa los poros capilares de la pasta, parte de ella está sujeta, aunque débilmente, a influencia de las fuerzas de superficie) y agua libre (tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad, ya que se encuentra fuera de la influencia de la superficie) (Sánchez de Guzmán, 1999).

La cantidad de agua de amasado debe ser la mínima que confiera a la mezcla la trabajabilidad requerida, debido a que un exceso de agua en el amasado,

aumenta el agua de evaporación, creando una red de poros capilares que disminuyen su resistencia.

1.4.1.2. Agua de curado

El curado es el proceso por el cual el cemento hidráulico madura y endurece, como producto de la hidratación continua del cemento mediante el agua de curado.

Por lo que el agua de curado constituye un suministro adicional de agua para hidratar de manera correcta al cemento. Este suministro depende de la humedad del ambiente, ya que la evaporación del agua libre aumenta con una humedad relativa menor del ambiente.

El agua de curado tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento y evitar una retracción brusca. Su actuación es más duradera que la del agua de amasado. Es una forma de garantizar las condiciones óptimas para que el mortero desarrolle su resistencia potencial de compresión y flexión y se reduzca la porosidad de la mezcla.

1.5. Aditivos

Según la norma UNE-EN 934-2: 2010 (UNE-EN 934-2, 2010), un aditivo es un producto incorporado en el momento de amasado de la mezcla en una cantidad no mayor al 5% en masa, con relación al contenido de cemento, con objetivo de modificar sus propiedades en estado fresco y/o endurecido.

1.5.1. Tipos de aditivos

La norma UNE-EN 934-3: 2010 (UNE-EN 934-3, 2010) cubre dos tipos de aditivos, los aditivos fuertemente retardadores de fraguado y los plastificantes o incursos de aire.

El aditivo inclusor de aire o plastificante incrementa la trabajabilidad, es decir, permite que se reduzca la cantidad de agua que se incorpora a la mezcla durante el amasado, generando una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente distribuidas, que se mantienen retenidas después del endurecimiento.

El aditivo retardador de fraguado permite reducir considerablemente el contenido en agua, sin modificar la consistencia, o que, aumenta en gran medida el asiento, sin modificar el contenido en agua.

Los mencionados anteriormente son los principales aditivos empleados en mortero de albañilería, pero se cuenta con una gran cantidad de variedades en el actual mundo de la construcción.

Los acelerantes de fraguado consiguen reducir el tiempo de fraguado del cemento que se encuentra en el mortero.

Los hidrófugos o repulsores de agua tienen como función principal disminuir la capacidad de absorción capilar que pasa a través del mortero saturado y sometido a un gradiente hidráulico.

Otros menos comunes son: aditivos para bombeo, inhibidores de corrosión, modificadores de la reacción álcali-áridos, colorantes, aditivos proyectantes, generadores de expansión, desaireantes, antiespumantes, generadores de gas, generadores de espuma, etc.

1.5.2. Requisitos de los aditivos

Todos los aditivos normalizados según la norma europea deben estar conformes con ciertos requisitos:

- Homogeneidad en el momento de su utilización. La segregación debe ser inferior a los límites fijados por el fabricante.
- Color uniforme y similar a la descripción del fabricante.
- Componente activo, el espectro infrarrojo no debe diferir significativamente del compuesto activo con relación al espectro de referencia del fabricante.
- Densidad absoluta (solamente para aditivos líquidos), que debe ser indicada por el fabricante.
- Extracto seco convencional, donde se debe comparar el valor indicado por el fabricante con el obtenido en el ensayo pertinente, y comprobar que se encuentra en límites tolerables.

- Valor del pH (solamente para aditivos líquidos), valor indicado por el fabricante, con una tolerancia de ± 1 .
- Contenido en cloruros totales, menor o igual al 0,10% en masa.
- Contenido en cloruros solubles en agua, menor o igual a 0,10% en masa.
- Contenido en alcalinos (expresado como Na_2O equivalente), inferior al máximo indicado por el fabricante en % en masa.
- Comportamiento frente a la corrosión.
- Contenido en dióxido de silicio SiO_2 , inferior al valor indicado por el fabricante en % en masa.

1.6. La biomasa del olivar

El olivar español se encuentra presente en 34 provincias de 13 Comunidades Autónomas, ocupando una superficie de 2,4 millones de hectáreas en donde se alcanza la cifra de 309 millones de olivos en España (MAPAMA, 2014).

Entre este número total de olivos, podemos encontrar dos variantes, el destinado a la aceituna de mesa y el destinado a la obtención de aceite de oliva. El primero debe ser podado anualmente, mientras que el segundo requiere ser podado cada dos años. La cantidad de biomasa producida por olivo es un dato que depende principalmente del porte y edad de los árboles, la situación, el número de pies y la densidad de plantación. Como se ha mencionado con anterioridad, se ha estimado que una hectárea de olivos genera unas tres toneladas de biomasa, por lo que la poda del olivar se convierte en uno de los residuos agrícolas más abundantes de Andalucía. Realizando datos estadísticos, se puede considerar de media que cada hectárea de olivar produce 3 toneladas de poda, por lo que se generan más de 7 millones de toneladas de poda al año (Junta de Andalucía, 2016).

Se puede considerar que el olivar genera dos fuentes de energía, la aceituna (aproximadamente 3 toneladas por hectárea, que genera en torno a 0.6 toneladas de aceite de oliva), y como residuo, la poda, que se descompone en leña, hoja y ramón. Teniendo en cuenta estas cifras, se aprecia que la poda de olivo representa el 60% de recurso (13% leña, 31% ramas, 16% hoja) (ASAJA, 2016).

Actualmente, se procede a un triturado posterior tras el proceso de poda del olivar. El triturado se realiza normalmente in-situ a través de trituradoras de podas, que son máquinas cuyo funcionamiento se basa en el giro de un rotor de eje horizontal a gran velocidad (generalmente a más de 7 m/s) en el interior de una cámara blindada. El rotor se forma por una serie de discos que montan en su periferia ejes sobre los que se articulan cuchillas, aunque también pueden ser masas de choque o martillos con diferentes formas según su función. Estos equipos se han empleado para formar una cubierta vegetal sobre el campo tratado, evitando la erosión y produciendo una maduración progresiva del suelo. Sin embargo, a raíz de la aplicación de los restos de poda para compostaje, han aparecido trituradoras que recogen de forma automática las astillas y la hoja en depósitos de diferente capacidad para su posterior uso (Junta de Andalucía, 2016).

Tradicionalmente, el uso energético de la poda ha estado ligado a la producción de leña como combustible doméstico. Sin embargo, a partir de la mejora de la retribución económica de los residuos agrícolas para la generación de electricidad en el RD 661/2007 (BOE-A-2007-10556, 2007) y a la necesidad de obtener nuevas fuentes de biomasa, el empleo de la poda como combustible en forma de astilla ha sufrido un incremento en la última década. Sin embargo, no se puede aprovechar la poda del olivo en su totalidad para el empleo de combustión de biomasa, debido a que la hoja de olivo posee baja densidad y bajo poder calorífico, por lo que sufre peligro de autocombustión.

Por tanto, solo el 20% de los residuos vegetales generados se emplean para este uso, debido a que su desarrollo depende de la demanda y consumo de las plantas de generación eléctrica con biomasa, por lo que en aquellas zonas donde no hay posibilidad de venta, la quema y el aporte al suelo siguen siendo las únicas opciones del agricultor (Junta de Andalucía, 2016).

La poda, ya sea empleada para uso energético o simplemente sea tratada como residuo vegetal, contiene un gran poder contaminante, ya que aproximadamente 2 kg de gas carbónico se emiten a la atmósfera por 1 kg de poda quemada (Corinaldesi et al., 2016).

1.6.1. Uso de residuos de biomasa en la fabricación de morteros

La Ley de Residuos (Ley 22/2011) constituye el instrumento fundamental de la política española en materia de residuos. Su objetivo es participar en la protección del medio ambiente y la salud humana, dando prioridad al reciclado y otras formas de valorización sobre su eliminación. La construcción es un sector con una gran demanda de recursos y materiales, por lo que tiene un enorme potencial de aprovechamiento de residuos. Por lo que una reutilización segura de este subproducto del olivo podría venir del sector de la construcción.

En el año 2002, el Ministerio de Medio Ambiente publicó *"El Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción"*, para contribuir a la demanda de productor reciclados con un aumento del conocimiento público sobre los residuos útiles para tales actividades.

En general, el empleo de agregados ligeros como elemento estructural de hormigón o mortero resulta ventajoso, por ejemplo, para mejorar el aislamiento térmico. Sin embargo, la ventaja más significativa es el valor medioambiental que se le da a la materia prima empleada, en particular si se obtiene de biomasa vegetal o de procesamiento de subproductos. Se han realizado numerosos estudios sobre el aprovechamiento de biomasa como agregado de materiales de construcción, a continuación se mencionan los más relevantes.

Algunos proyectos de investigación han utilizado la ceniza de madera como sustituto de cemento en mezclas de hormigón o mortero con buenos resultados, pero el proceso de incineración puede dar lugar a grandes aportaciones de CO₂ y gases de efecto invernadero a la atmósfera.

El uso de subproductos de madera como sustitución de cemento en morteros no ha mostrado una buena mejora de las propiedades mecánicas debido a la incompatibilidad química entre la biomasa y el cemento (Turgut y Algin, 2007). Las características de los morteros dependen de la naturaleza de la biomasa utilizada, ya que tienen diferencias en sus propiedades como constitución anatómica, características físicas y constitución química. Se han realizado estudios de astillas de madera (hasta 8 mm) en una probeta de cemento y arcilla para probar la sorptividad del agua, concluyendo que los agregados de madera reducían la

absorción por capilaridad y mejoraban las propiedades térmicas y aislantes (Bouguerra et al., 2002).

Hay ensayos que demuestran que las virutas de madera pueden agregarse al mortero sin ningún tratamiento preliminar, obteniendo como ventajas la disminución de la densidad de mortero y la conductividad térmica (Bederina et al., 2009).

Los resultados de un estudio de residuos de serrín como sustitutivo parcial de la arena obtuvieron como resultado que, independientemente del porcentaje de residuos de madera empleado, los peores resultados obtenidos fueron con la relación de arena a cemento más alta de 1:3, por lo que redujeron esta relación a 1:2, para unos porcentajes de serrín de 2,5% y 5%. Además, las características mecánicas de los morteros preparados con serrín fino con aditivo plastificante (WRA) fueron superiores a las de los preparados con serrín grueso, aunque el serrín fino tenía la contraindicación de poseer mayor absorción de agua (Corinaldesi et al., 2016).

Con objeto de mejorar la compatibilidad química entre los constituyentes del cemento Portland y que ocurra una adecuada hidratación del cemento y exista una red de silicatos conectando las partículas vegetales se someten a diversos tratamientos para eliminar y/o extraer las sustancias inhibidoras y/o minimizar su recorrido hacia la superficie de las partículas vegetales (Simatupang et al., 1988).

Se han estudiado el empleo de distintos tratamientos para la mineralización de las biomásas vegetales. Así Furuno et al. (Furuno et al., 1991) y Beraldo et al. (Beraldo et al., 2000) emplearon Na_2SiO_3 , CaCl_2 y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para proteger la madera contra el fuego y contra el ataque de los hongos, no obstante la resistencia mecánica del mortero disminuyó en el caso de que no se efectuara la mineralización de las partículas vegetales. Otros pretratamientos estudiados han sido solución de cloruro de calcio (Moslemi y Lim, 1984); solución acuosa de hidróxido cálcico (Corinaldesi et al., 2016) o soluciones de silicato de sodio y sulfato de aluminio, solución de silicato de sodio y cloruro de calcio o solución de cloruro de calcio (Beraldo y Balzano, 2009). Coatanlem et al., (Coatanlem et al., 2000) saturaron astillas de madera en una solución acuosa de silicato sódico, con la que se consiguió mejorar la unión de la interfaz madera-cemento.

Varias son las ventajas del empleo aportadas por el empleo de los compuestos de madera y cemento. Los “agregados” vegetales se encuentran disponibles a un precio competitivo y a diferencia de los minerales (arena) son materiales renovables. Los morteros que incorporan biomásas vegetales permiten almacenar de una forma eficiente el gas carbónico, pues considerándose una dosis de 200 a 300 kg de residuos vegetales empleados en un metro cúbico de mortero, se puede estimar alrededor de 500 kg de gas carbónico potencialmente inmovilizado en la matriz de cemento. Esa cantidad de gas carbónico sería emitida a la atmósfera en caso de que madera fuera quemada. (Corinaldesi et al., 2016). Por lo tanto, la valorización del residuo y su valor medioambiental son la ventaja más significativa de su utilización como agregados ligeros en materiales a base de cemento.

Por lo que se ha comentado hasta ahora, se puede llegar a la conclusión de que la industria de la construcción puede absorber una gran cantidad de residuos. La valorización material supone una alternativa prioritaria para la gestión de residuos, teniendo el sector de la construcción un enorme potencial en la colaboración con la gestión de los residuos, pues es capaz de incorporar subproductos de otros sectores.

Una de las opciones propuestas por la directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (BOE, 2008) es la utilización de adiciones que sustituyan la grava como agregado de hormigones o morteros, y puedan contribuir a mejorar algunas de sus características.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este TFG es utilizar los residuos que genera la poda del olivar como sustitutivo parcial de los áridos que conforman las matrices de mortero de cemento y analizar la viabilidad de estos componentes por medio de su comportamiento físico y mecánico.

Para poder conseguir el objetivo principal, vamos a tener que tener en cuenta los siguientes puntos:

- Evaluación de la posibilidad de utilizar residuos de poda de olivo triturada como sustitutivo parcial de la arena para actuar como aligerante de morteros
- Estudio de los porcentajes óptimos de aligerante para unas propiedades físicas y mecánicas adecuadas
- Influencia de los pretratamientos de mineralización de la poda de olivo en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros aligerados
- Viabilidad económica del empleo de estos materiales en el mortero

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Para la elaboración de las probetas de mortero con adiciones de residuos se han empleado las siguientes materias primas:

- Cemento Portland de alta resistencia CEM II/A-V 42,5 R, suministrado por la empresa HOLCIM S.A.
- Arena normalizada CEM para ensayos de cementos según DIN EN 196-1, facilitado por el Instituto Torroja.
- Agua potable proveniente de la Universidad de Jaén.
- Ramas y hojas de olivo procedentes de la poda del olivar. Se ha llevado a cabo la partición y posterior trituración de la poda con una trituradora AEG que incorpora tamizado (Figura 3.1 y Figura 3.2), para conseguir un tamaño de fibra igual al de la arena empleada.



Figura 3.1. Trituradora AEG



Figura 3.2. Rodillo de trituración al finalizar el proceso

El empleo de la poda de olivo como sustitutivo parcial de la arena presenta varias ventajas, disponible a un precio competitivo, coste cero, y son renovables, a diferencia de los áridos (arena) generalmente empleados en la fabricación de morteros. Aunque la mayor ventaja es su valorización como residuo y su sostenibilidad medioambiental.

El proceso de investigación se ha desarrollado en varias fases. En la primera fase se ha llevado a cabo la preparación de la poda, por lo que se ha procedido a su trituración, para posteriormente la realización de las mezclas de mortero pertinentes. También se ha estudiado el comportamiento de la poda de olivo triturada con un

pretratamiento, consistente en su saturación en una disolución acuosa del 10% de hidróxido cálcico para mejorar la mineralización. Durante el proceso de curado en cámara húmeda, a 7 y 28 días, se ha llevado a cabo un estudio volumétrico de las probetas. En la segunda fase, se ha realizado el estudio de las propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos normalizados.

3.2. Procesos de caracterización de las materias primas

3.2.1. Humedad y materia volátil

Según la norma TAPPI T 11 m-59, la humedad se determina a partir de la pérdida de peso que experimenta una muestra próxima a un gramo, cuando se somete a la temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$, durante el tiempo suficiente para que se alcance pesada constante. Donde el valor de humedad se expresa en porcentaje:

$$\% \text{ humedad} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

(Fórmula 3.1)

Siendo m_i la masa inicial y la m_f la masa final tras el proceso de secado.

3.2.2. Determinación de la densidad relativa y superficie específica

Mediante el frasco volumétrico de LeChatelier se determina la densidad relativa, mientras que para el cálculo de la superficie específica se emplea el método de Blaine.

Para calcular la densidad aparente se requiere realizar dos lecturas distintas, siendo la primera la obtenida de sumergir el matraz en un baño de agua con un nivel comprendido entre las graduaciones de 0 y 1 cm^3 (N_1), y la segunda realizando un tanteo de la cantidad de material necesaria para obtener un volumen próximo a los 20 cm^3 (N_2).

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{masa del material (g)}}{\text{volumen desplazado (cm}^3\text{)}}$$

(Fórmula 3.2)

El principio del método de Blaine consiste en hacer pasar una cantidad determinada de aire por una capa de cemento con una porosidad conocida. El

tamaño y la cantidad de los poros que existen en la capa son función del tamaño de las partículas, determinando de esta forma el gasto de aire que atraviesan la capa.

3.2.3. Distribución granulométrica

Para la distribución granulométrica del cemento Portland se ha empleado un equipo Malvern-Mastersizer 2000. El equipo requiere que el material sólido se encuentre disperso en un medio líquido, en un rango comprendido entre 0,02 y 1500 micras, con la ayuda de la tecnología de Difracción de luz Láser.

3.2.4. Análisis elemental (CHNS-O)

El análisis elemental tiene como objetivo determinar el contenido en carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno existentes en las materias primas. Los datos se obtienen mediante combustión de las muestras a 950°C en atmósfera O₂ usando el analizador elemental CHNS-O ThermoFinnigan Flash EA 1112. Los gases producto de la combustión son transportados por el gas portador por un tubo de reducción, donde se separan en una columna cromatografía, siendo detectados por un detector de conductividad térmica (T.C.D.), que da como respuesta una proporción de concentración de los componentes individuales de la mezcla.

3.2.5. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se ha determinado la composición química de los materiales mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) empleando el equipo Philips Magix Pro (PW-2440), espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva con generador de rayos X. La técnica consiste en excitar la muestra con una fuente emisora de rayos X. La radiación incidente expulsa electrones de capas internas del átomo, mientras que los de las capas exteriores ocupan los lugares vacantes. Este exceso energético se disipa en forma de fotones. La radiación es característica de cada elemento dentro del espectro.

3.2.6. Caracterización mineralógica (DRX)

Mediante la Difracción de Rayos X (DRX) se obtiene la identificación y cuantificación del contenido en fases cristalinas en los bloques de cemento Portland. Esta técnica se fundamenta en incidir un haz de rayos X, con un ángulo determinado, sobre la muestra. Parte del haz se dispersa en todas las direcciones

debido a los electrones asociados a los átomos o iones existentes en la trayectoria. Sin embargo, la otra parte del haz puede dar lugar al fenómeno de la difracción de rayos X, obteniendo así las fases cristalinas.

Los datos obtenidos se han evaluado en un difractómetro automatizado de rayos X X'Pert Pro MPD (PANalytical) equipado con Ge (111) monocromo primario, empleando radiación Cu K α ($\lambda = 1,5406$) monocromático y un detector de rayos X. La identificación posterior de las fases cristalinas se han identificado mediante el software High Score Plus de PANalytical utilizando la base de datos COD_201.

3.2.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para la toma de imágenes de estas muestras, se utilizó un microscopio electrónico de barrido de alta resolución (FESEM), MERLIN de Carl Zeiss, con capacidad analítica EDX y WDX de Oxford. Es un sistema de ultra alta resolución que permite trabajar con todo tipo de muestras, tanto en imagen como en análisis, disponible en el CICT de la Universidad de Jaén. El equipo está equipado con un cañón de emisión de electrones por emisión de campo de punta caliente. Permite una resolución máxima de la imagen en electrones secundarios (SE) de 0,8 nm a 15 Kv, de 1,4 nm a 1kv y de 2,4 nm a 0,2 Kv. El rango de potencial de aceleración está comprendido entre 0,02 V y 30 kV.

El equipo dispone de un sistema de análisis químico (microanálisis), y consta de diversos detectores. En la Figura 3.3, se muestra el SEM utilizado.



Figura 3.3. Equipo de microscopía electrónica de barrido

3.2.8. Determinación del contenido en lignina

Según el método aplicado, norma TAPPI T 222 os-74, la lignina se define como el constituyente de la madera insoluble en H_2SO_4 del 72%.

3.2.9. Contenido en celulosa y hemicelulosa

Para conocer la cantidad de estos dos componentes, se determinan los porcentajes de fibra neutro detergente (FND) y fibra ácido detergente (FAD) del material lignocelulósico. Una vez determinado el contenido en lignina se pueden calcular los porcentajes de hemicelulosa y celulosa en la muestra mediante las expresiones:

$$\% \text{ hemicelulosa} = \% FND - \% FAD$$

(Fórmula 3.3)

$$\% \text{ celulosa} = \% FAD - \% \text{ lignina}$$

(Fórmula 3.4)

3.2.10. Análisis vibracional (FT-IR)

Los análisis de infrarrojo de las muestras, se llevaron a cabo mediante un espectrómetro FT-IR Bruker Tensor 27, disponible en el Centro de Investigación Científica (CICT) de la Universidad de Jaén (Figura 3.4).

El equipo tiene un rango espectral de $7500 - 370 \text{ cm}^{-1}$, con un divisor del haz de bromuro potásico (KBr). Está provisto de un detector DLaTGS de alta sensibilidad, y ventanas de KBr e interferómetro con alineación permanente Rocksolid™ de alta estabilidad.

Se utilizó el método de Reflexión Total Atenuada (ATR), para evitar posibles zonas de saturación del espectro. Este método se basa en la reflexión interna total cuando el haz incide en un medio con menor índice de reflexión y con un ángulo denominado crítico. En estas condiciones la radiación se refleja totalmente (Mirabella, 2001).

Aunque no exista propagación, sí que existe absorción por parte de la muestra, y la absorción producirá la atenuación de la radiación, formando el correspondiente espectro.



Figura 3.4. Espectrómetro FT-IR

3.3. Elaboración de probetas de mortero

Se realiza la preparación de una serie de matrices de mortero para su posterior experimentación en ciertos ensayos normalizados, a las edades de 7 y 28 días.

Para la preparación, amasado y curado de las probetas de mortero se sigue como referencia la Norma UNE-EN 196-1: 2005 (UNE-EN 196-1, 2005).

3.3.1. Requisitos para la fabricación de morteros

Según la norma UNE-EN 196-1 (UNE-EN 196-1, 2005), las probetas deben tener forma prismática de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Se caracteriza por una consistencia plástica, compuesta por una parte en masa de cemento, tres partes en masa de arena normalizada CEN y con una relación agua/cemento de 0,50.

El laboratorio donde se realiza la preparación de las matrices se debe mantener a 20°C, con una tolerancia de 2°C, y con una humedad relativa superior del 50%.

El molde tiene que disponer de tres compartimentos horizontales, para facilitar el preparado de manera simultánea de tres probetas prismáticas. El material empleado en su fabricación debe ser el acero, con un espesor de pared aproximado de 10 mm.

3.3.2. Proceso de fabricación de las probetas de mortero

Los moldes se componen de una base y dos paredes frontales y traseras unidas a ella, además de cuatro paredes desmontables que sirven para separar las tres probetas y facilitar su desmolde. Las placas frontal y trasera disponen de unas ranuras en las que encajar las piezas desmontables para obtener un cierre hermético con la ayuda de un tornillo de presión para empacar el conjunto.

Para el proceso de desmoldado, se desenrosca el tornillo, y con ayuda de un mazo de goma para no deformar el molde, se retiran las partes móviles con cuidado para sacar las matrices. Por último, se limpian los moldes y se untan con aceite anticorrosión para ayudar a su conservación.

Procedimiento de fabricación de las probetas:

1.- Peso en balanza de precisión de las cantidades requeridas de cada materia. Se va a proceder a reemplazar la arena por un 10, 25 y 50 % en volumen de poda de olivo sin tratar y tratada con una solución acuosa de hidróxido cálcico.

2.- Amasado del mortero siguiendo las indicaciones de la norma: se vierten primero la mezcla de cemento y agua en el recipiente de la amasadora, se pone la marcha de velocidad baja durante 30 segundos. Pasados estos, se introduce la arena durante 30 segundos por la tolva, para después poner la amasadora a velocidad rápida durante 30 segundos. Se para la amasadora durante 90 segundos, empleando los 30 primeros en retirar con ayuda de una espátula metálica el mortero adherido a las paredes laterales del recipiente y colocando la masa en el centro de la amasadora, y los últimos 60 segundos se deja reposar la mezcla. Por último, se

continúa con el amasado a velocidad rápida durante 60 segundos, obteniendo la masa fresca de mortero (Figura 3.5). La máquina de amasado empleada es una amasadora planetaria Proeti Mortar Mixer C0085CE, ubicada en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales de la Universidad de Jaén (Figura 3.6).



Figura 3.5. Mezcla fresca



Figura 3.6. Amasadora empleada

3.- Enmoldado de las probetas, inmediatamente después de la preparación del mortero en el molde. Este proceso se divide en dos partes. En la primera se introduce directamente de recipiente al molde con una cuchara adecuada hasta llegar a una capa uniforme a la mitad de la altura de la pared, para a continuación compactar esta primera capa con 60 golpes contra la mesa elevando el molde con ayuda de tornillo de presión. En la segunda parte se introduce la segunda capa de mortero asegurando que hay excedente de material, se iguala con una espátula pequeña y se compacta con otros 60 golpes. Inmediatamente, se quita el exceso de masa con la ayuda de una regla plana, manteniéndola con una ligera inclinación en la dirección del movimiento, aunque casi vertical al molde, con lentos movimientos de sierra, una vez en cada dirección. Se repite este proceso con un ángulo más agudo hasta asegurar que la superficie queda plana y sin exceso de material. Se quitan los restos de mortero adheridos en los perímetros del molde como consecuencia del enrasado y se marcan los moldes para identificar las matrices (Figura 3.7).



Figura 3.7. Moldes con morteros en proceso de fraguado

- 4.- Fraguado de los morteros durante 24 horas en el ambiente del laboratorio.
- 5.- Desmoldeo de las probetas, que se lleva a cabo sin dañarlas, siendo aceptable realizarlo entre 20 y 24 horas después del enmoldado. Se admite el uso de martillos de plástico o de goma para facilitar el proceso.
- 6.- Curado de las probetas en cámara húmeda con 95% de humedad relativa, un total de 7 o 28 días, según el tiempo de curado estudiado en cada caso.
- 7.- Inmersión de las probetas en acetona 24 horas para detener el proceso de curado de las probetas, manteniéndolas en el estado requerido para su estudio (Figura 3.8).



Figura 3.8. Probetas sumergidas en acetona

3.4. Ensayos físicos

3.4.1. Determinación de la densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente en seco de los morteros endurecidos se sigue la Norma UNE-EN 1015-10. 2010 (UNE-EN 1015-10, 2010).

La densidad aparente en seco de una probeta determinada de mortero endurecido se calcula dividiendo su masa en estado seco entre el volumen que ocupa al sumergirse en agua en estado saturado.

El primer paso a seguir para realizar el ensayo es secar la probeta en una estufa a una temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. En el caso de contener áridos orgánicos, la temperatura de secado se modifica a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La masa de la probeta seca es el peso resultante de este proceso ($m_{s,\text{sec}}$).

Para determinar el volumen de la probeta hay que realizar dos pesos distintos. Se sumerge en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 24 horas para asegurar la saturación de la pieza (Figura 3.9). Se elimina el exceso de agua con un paño húmedo y se pesa la probeta en una balanza de precisión (Figura 3.10), anotando este peso en kilogramos ($m_{s,\text{sat}}$). Posteriormente se realiza la pesada hidrostática (Figura 3.11), que se realiza con la ayuda de una cesta suspendida de un peso y completamente sumergida en un recipiente con agua. La probeta saturada se coloca en el estribo, con cuidado de que no queden burbujas de aire superficiales atrapadas en las caras de las probetas. Al finalizar la oscilación de la balanza hidrostática, se pesa la probeta sumergida y se anota la masa en kilogramos ($m_{s,i}$).



Figura 3.9. Probetas en agua



Figura 3.10. Peso de una probeta



Figura 3.11. Probeta en balanza hidrostática

El volumen de la probeta en m³, se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w}$$

(Fórmula 3.5)

El valor medio se calcula a partir de todos los valores individuales dados para cada probeta, redondeando todos los valores en torno a 10 kg/m³.

3.4.2. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad

Para la determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad de mortero endurecido se va a seguir la Norma Española UNE-EN 1015-18: 2003 (UNE-EN 1015-18, 2003).

Para la realización de este ensayo se requiere que las probetas estén partidas en dos mitades, por lo que se realiza después del ensayo de flexión.

El paso previo a realizar consiste en la aplicación de un material de sellado a las cuatro caras laterales del semiprisma, unos 20 mm de altura sobre la cara rota de la pieza. El material de sellado puede ser cera de parafina o resina sintética, que se caracterizan por tener un punto de fusión superior a 60°C. Esta característica es fundamental, ya que a continuación, los semiprismas se deben secar en una estufa con ventilación a la temperatura de 60 ± 5 °C hasta conseguir una masa constante. Para asegurar el secado, se dejan en la estufa un intervalo de 24 horas, y se pesan al terminar el proceso (este peso se denomina M0).

Las probetas secas se colocan en una bandeja con las caras rotas (superficie de rotura) vueltas hacia abajo, con ayuda de unos soportes que impidan que toquen el fondo de la bandeja, y se sumergen en agua hasta una altura de 5 o 10 mm durante el tiempo de ensayo (Figura 3.12). El nivel del agua debe permanecer constante durante el ensayo, por lo que se cubre la bandeja para evitar la evaporación (Figura 3.13).



Figura 3.12. Ensayo de capilaridad



Figura 3.13. Bandeja cubierta para evitar evaporación

Los tiempos de ensayo son dos, el primero es de 10 minutos, y es el tiempo de inmersión de los semiprismas en el agua, se pesan inmediatamente después de ser retirados del recipiente y tras haber eliminado el agua superficial con un paño humedecido (este peso se denomina M1). El segundo tiempo de ensayo es de 90 minutos, repitiendo el mismo procedimiento anterior (este peso se denomina M2).

Por definición, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es igual a la pendiente de la recta que une los puntos de las medidas tomadas en el tiempo de ensayo de 10 y 90 minutos. Se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$C = 0,1 \times (M2 - M1)$$

(Fórmula 3.6)

Las unidades del coeficiente de absorción de agua por capilaridad son $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$.

3.5. Ensayos de resistencias mecánicas

3.5.1. Resistencia a flexión

Se coloca el prisma en la máquina de ensayo que utiliza el método de carga de los tres puntos, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con el eje longitudinal de la matriz normal a estos. Se aplica una carga vertical mediante los rodillos de carga, sobre la cara lateral opuesta, incrementándose de uniformemente a una velocidad de $50 \pm 10 \text{ N/s}$ hasta la rotura. En este caso emplearemos una máquina MTS Insight 5 Material Test System del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales de la Universidad de Jaén (Figura 3.14).



Figura 3.14. Máquina para ensayo de flexión

La resistencia a flexión, R_f , se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b \times d^2}$$

(Fórmula 3.7)

donde: R_f es la resistencia a flexión (MPa); b es la base de la probeta (mm); d es la altura de la probeta, es decir, el lado sobre el que se apoya en el rodillo (mm); F_f es la carga aplicada en el centro del prisma en la rotura (N); l es la distancia entre soportes (mm).

Las superficies de fractura después del ensayo de flexión se observaron mediante microscopía empleando un microscopio estereoscópico BMS S-05-L 76095.

3.5.2. Resistencia a compresión

Como resultado del ensayo de flexión se obtienen semiprismas rotos, aunque también se pueden obtener estas mitades utilizando medios adecuados que no sometan las matrices a ningún daño.

Para la realización del ensayo a compresión se requiere tener estos semiprismas, pues se ensayan cargando sus caras laterales con ayuda del equipo especificado. En este caso se ha empleado la prensa de laboratorio MTS 810 Material Testing Systems del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales de la Universidad de Jaén (Figura 3.15). La prensa se encuentra conectada a un ordenador, que con ayuda de un software específico, muestra los resultados en un gráfico de tensión-deformación para cada probeta ensayada. Para facilitar el cálculo, se ha empleado un utensilio auxiliar para introducir la probeta y homogeneizar el área de compresión (40 x 40 mm) de todas las probetas.



Figura 3.15. Máquina de resistencia a la compresión del laboratorio y utensilio empleado

Se centra cada mitad lateralmente con relación a los platos de la máquina, con una tolerancia de $\pm 0,5$ mm, y longitudinalmente de forma que la base del prisma sobresalga como máximo de las placas auxiliares unos 10 mm.

Se aplica una carga que aumenta uniformemente a una velocidad de 2400 ± 200 N/s durante el tiempo que dure el ensayo, que es hasta que se produzca la rotura del semiprisma.

La resistencia a compresión R_c se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

(Fórmula 3.8)

Donde: R_c es la resistencia a compresión (MPa); F_c es la carga máxima de rotura (N); S es la superficie de la cara de la probeta sometida a la carga (mm^2).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de las materias primas

4.2.1. Caracterización del cemento Portland

4.2.1.1. Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa

En la Tabla 4.1 se recogen los valores obtenidos de humedad, pH, contenido en carbonatos, superficie específica y densidad relativa del cemento Portland tipo II. El cemento Portland carece prácticamente de humedad

Muestra	Humedad (%)	pH	Carbonatos (%)	Área superficial (cm ² /g)	Densidad relativa (g/cm ³)
Cemento Portland	0,25	11,8	16,98 ± 0,96	3670	2,840

Tabla 4.1. Valores característicos del cemento Portland

La presencia de carbonatos en el cemento Portland es debido a la adición de caliza.

Los valores de superficie específica del cemento Portland ha sido obtenidos por el método de Blaine (Cebrian y Pisonero, 1971). Las superficies específicas favorecen la reacción puzolánica, favoreciendo la producción de productos sólidos insolubles y dotados con resistencia mecánica.

Los valores de densidad relativa se han obtenido mediante el frasco volumétrico de Le Chatelier.

4.2.1.2. Distribución granulométrica

La distribución del tamaño de partícula de la poda de olivo se ajusta al de la arena normalizada. La Figura 4.1, muestra la distribución de tamaño de partícula del cemento Portland, que presenta un tamaño medio de partícula D_{50} de 10,64 μm . El cemento Portland presenta en volumen un porcentaje de partículas finas (<2 mm) del 11,95 %, un 86,30% de partículas del tamaño de la arena y un 1,75% de partículas de tamaño de limo (Tabla 4.2), con un 90% de partículas por debajo de 35,56 micras. El tamaño de partícula influye en la actividad puzolánica debido al

aumento de la superficie de las partículas y a la velocidad de la reacción hidráulica (Agarwal, 2006).

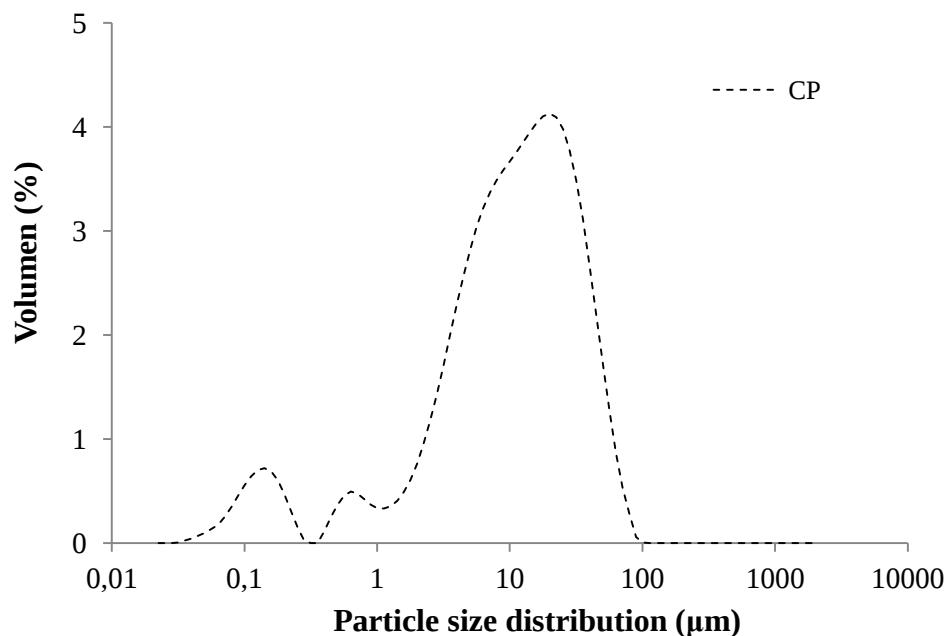


Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula del cemento portland

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

Tabla 4.2. Distribución del tamaño de partícula del cemento Portland

4.2.1.3. Análisis elemental (CHNS-O)

El análisis CHNS (Tabla 4.3) muestra que el cemento Portland no contiene prácticamente nitrógeno, sin embargo tiene una presencia importante de azufre (0,420 %). Su contenido en carbono (0,66 %) proviene de la descomposición de la calcita.

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. Análisis elemental (CNHS-O) de los residuos

4.2.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se ha obtenido la composición química del cemento Portland mediante FRX (Tabla 4.4). El cemento portland se compone por CaO (58,8 %), una cantidad considerable de SiO₂ (21,4 %), cantidades menos importantes de Al₂O₃ (5,9 %) y Fe₂O₃ (3,9 %) y una escasa cantidad de sulfatos SO₃ (4,0 %).

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 cemento Portland

4.2.1.5. Caracterización mineralógica (DRX)

En el patrón de difracción del cemento Portland (Figura 4.2) se observan los picos de difracción de silicato tricálcico o alita (C_3S) y silicato dicálcico o belita (C_2S), presentando en menor proporción del aluminato tricálcico (C_3A) y la aluminoferrita tetracálcica (C_4AF).

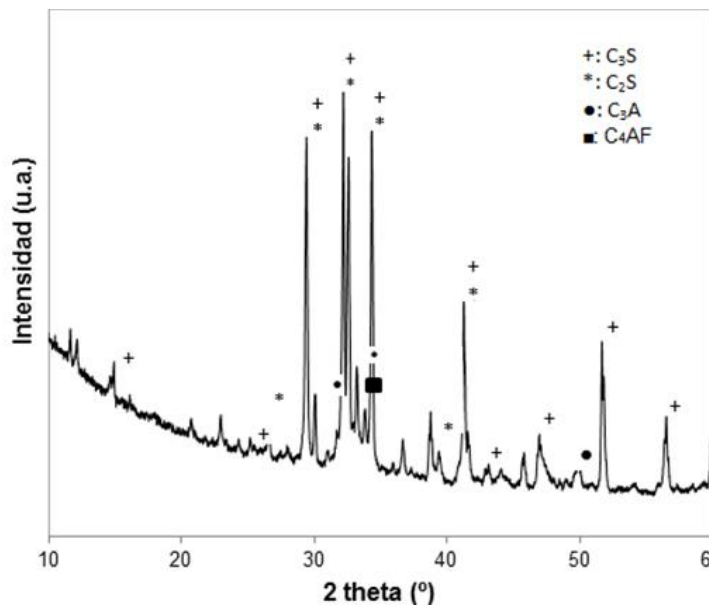


Figura 4.2. DRX del cemento Portland

4.2.1.6. Caracterización microestructural (SEM)

El estudio microestructural del cemento Portland se ha realizado mediante microscopía electrónica de barrido y análisis EDAX (Figura 4.3). La mayor parte de las partículas del cemento Portland son angulares, con formas irregulares, presentando también partículas esféricas perfectas. El análisis EDAX indica que las partículas angulares están compuestas principalmente por Ca, aunque también contienen Si, Al, Mg, Fe y S. Por su parte, las partículas esféricas son más ricas en Si y Al, conteniendo menores cantidades de K.

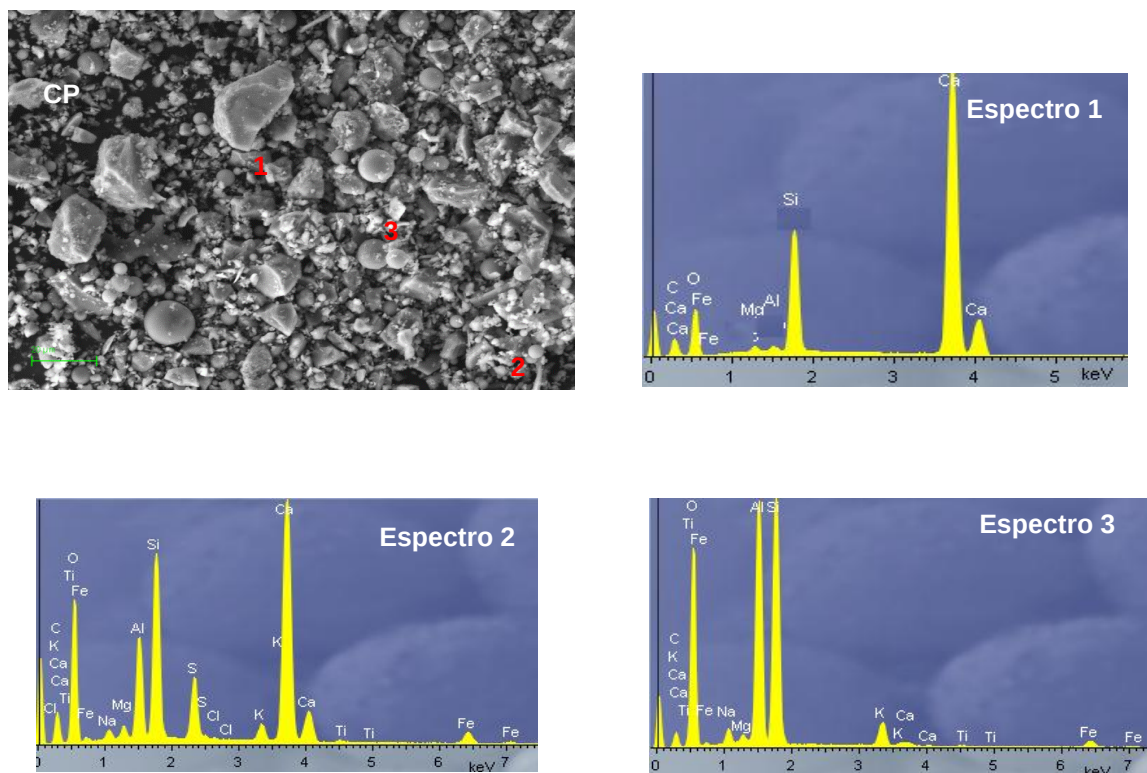


Figura 4.3. Imágenes SEM-EDAX del CP (4.5 Kx)

4.2.2. Caracterización de las fibras de poda de olivo

En la Figura 4.4 se muestran detalles de la fibra de madera y de la hoja de poda de olivo sin tratamiento previo, mientras que en la Tabla 4.5 se recogen los resultados de caracterización de las fibras ilustradas, en los ensayos de humedad, cenizas, celulosa, hemicelulosa y lignina.

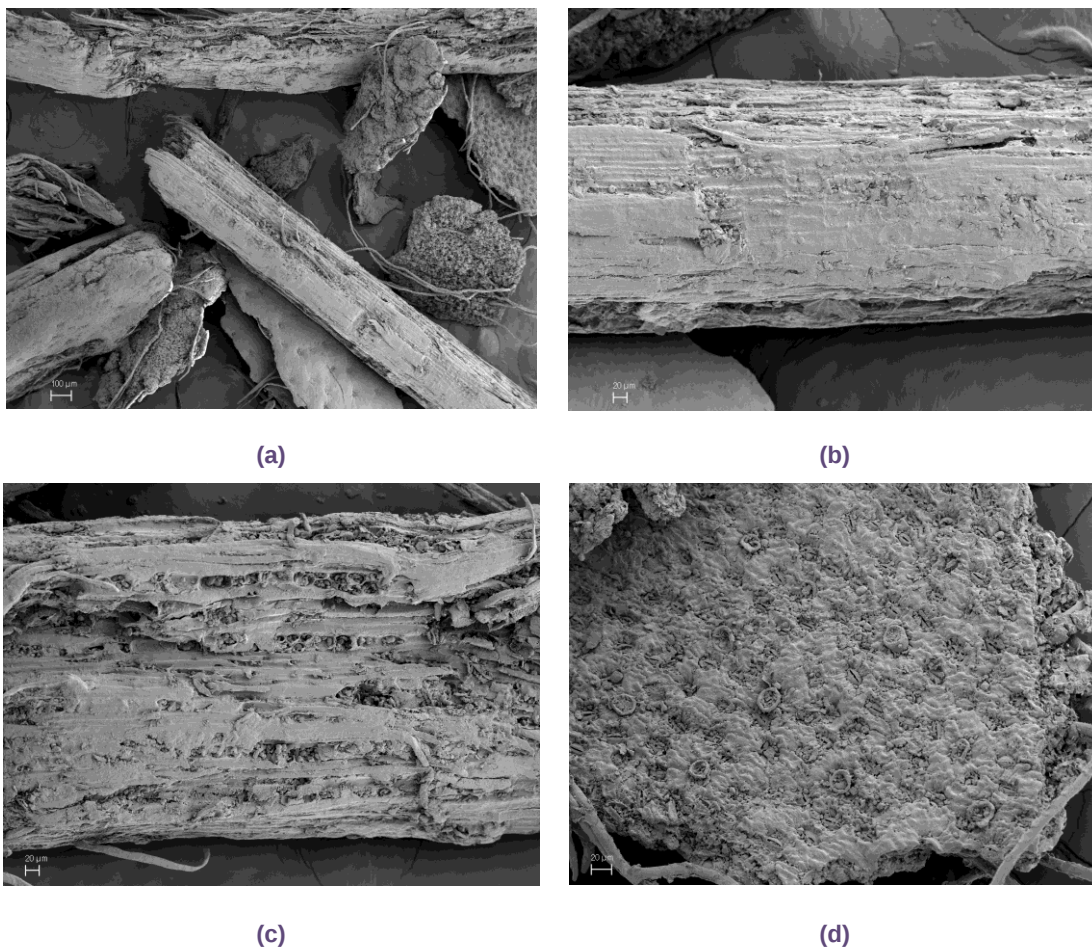


Figura 4.4. (a) Poda sin tratamiento previo, (b) Detalle de fibra de madera sin tratamiento
(c) Detalle de fibra de madera, (d) Detalle de fibra de hoja

Fibra	Humedad (%)	Cenizas (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Poda sin tratamiento (PST)	4,49	0,178	18,51	20,71	23,67

Tabla 4.5. Caracterización de las fibras de poda de olivo

En la Figura 4.5, se muestran los espectros de madera, poda y hoja de olivo sin tratamiento. Se aprecia que al ser la poda una mezcla de tallos, ramas y hojas, su espectro es una combinación de los espectros de la madera y la hoja.

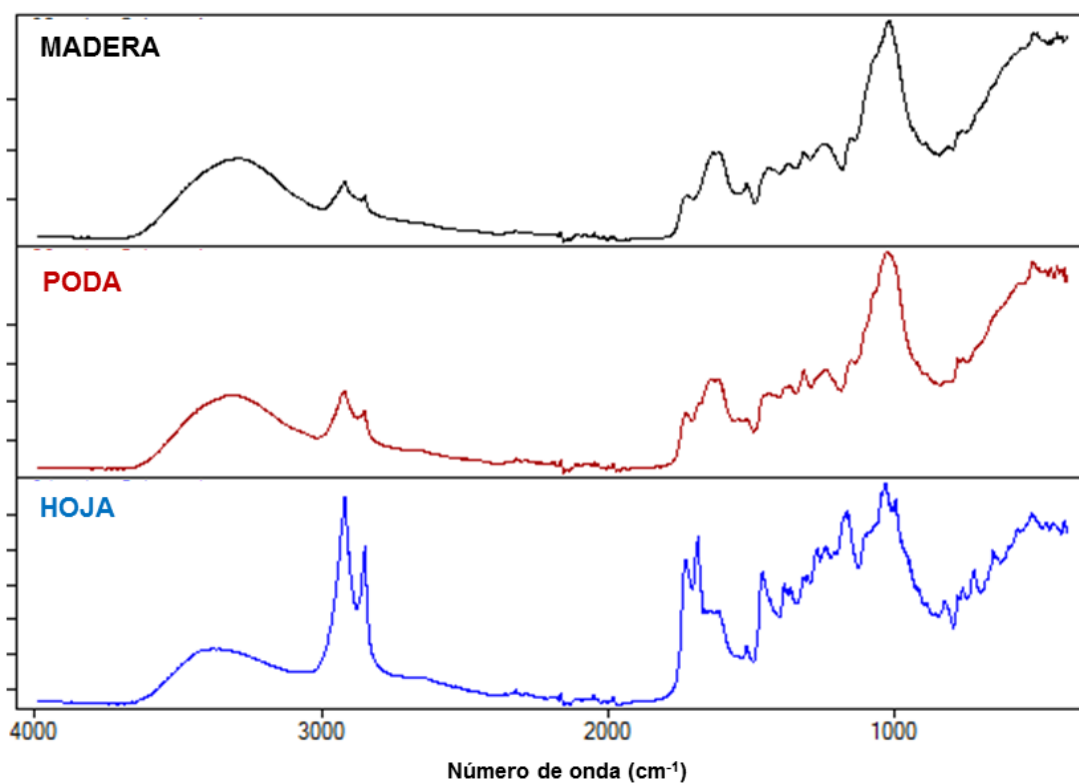


Figura 4.5. Espectros FTIR de la madera, poda y hoja de olivo

Las posiciones aproximadas y las asignaciones de los picos se recogen en la Tabla 4.6.

Número de onda (cm ⁻¹)	Asignación	Referencias
3200-3500	-OH en la celulosa, hemicelulosa y lignina	Ma et al., 2015
2918	C-H en la metilos y metilenos	Kabir et al., 2013
1737	C=O en la hemicelulosa y pectina	Cai et al., 2015 Roy et al., 2012
1513	C-H en la hemicelulosa y pectina	Cai et al., 2015
1422, 1159	Típico pico de absorción de la celulosa	Baek et al., 2013
1247	Grupos acetilo de la lignina	Sinha et al., 2008
1104	C-O-C de la celulosa	Cai et al., 2015
1032	C-O/C-C	O'Sullivan, 1997
897	C-OH (enlaces β-glucídicos entre monosacáridos)	Sun et al., 2015

Tabla 4.6. Posiciones y asignaciones de las fibras vegetales

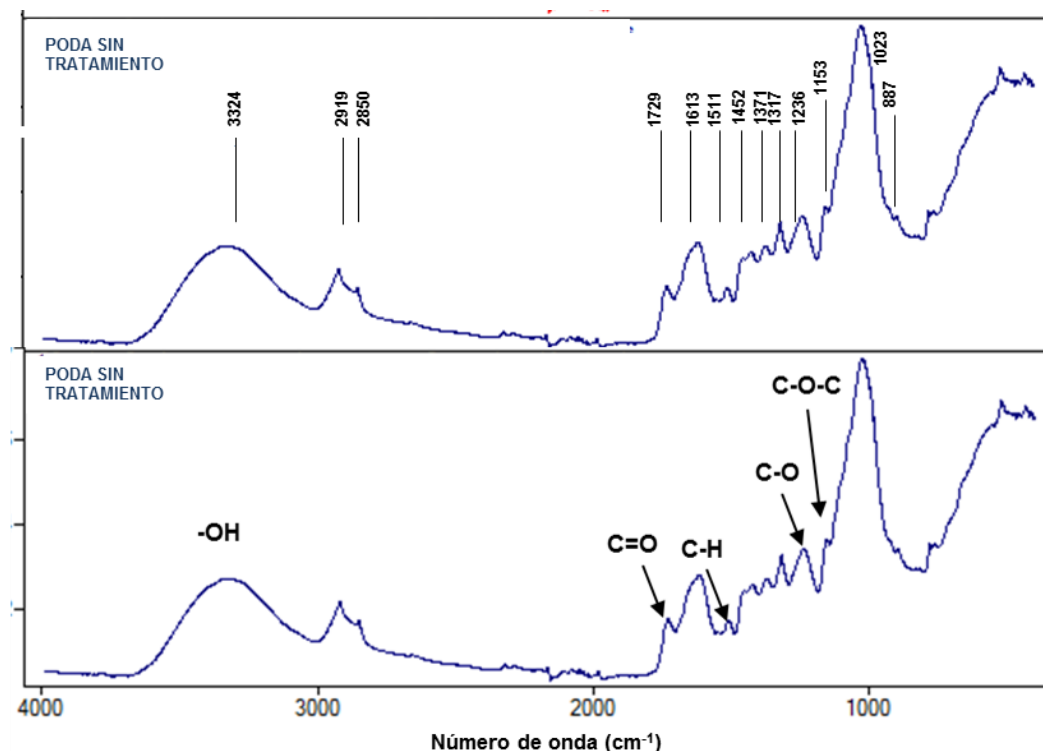


Figura 4.6. Espectros FTIR de la poda sin tratamiento

Se identifican las bandas típicas de las muestras de fibras, y se observan los principales enlaces característicos de la celulosa, lignina y hemicelulosa, que son los constituyentes fundamentales de la misma. Se refleja la gran tendencia hidrofílica de las fibras, dada la gran banda entre $3100\text{--}3700\text{ cm}^{-1}$, que corresponde con los grupos --OH existentes en los alcoholes alifáticos y aromáticos presentes en sus principales componentes. El pico correspondiente al estiramiento del enlace C-H de la celulosa y hemicelulosa, se encuentra en las fibras en torno $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, es muy característico y se distingue fácilmente en contraposición con la gran cantidad de picos en la región de $1000\text{ a }1750\text{ cm}^{-1}$. Comparando con los espectros de la hemicelulosa y lignina (Bodîrlău *et al.*, 2009), se pueden identificar que las absorciones en la región de $1510\text{ a }1600\text{ cm}^{-1}$ corresponden a la lignina, y la absorción en torno a 1730 cm^{-1} a la hemicelulosa; esto indica el estiramiento del enlace C=O en cetonas no conjugadas, grupos carbonilos y en ésteres. La aparición de una banda a 1600 cm^{-1} , está asociada al esqueleto aromático de la lignina. Por debajo de 1700 pueden aparecer, en forma de pequeños hombros, los estiramientos de los enlaces C=O conjugados o cetonas aromáticas (Zhang *et al.*, 2015).

4.3. Composición de las mezclas

Las matrices de mortero para este TFG están constituidas por un reemplazo de arena de un 10, 25 y 50 % en volumen por poda de olivo, además de una matriz base conteniendo solo arena que sirve para comparar los resultados obtenidos en las probetas estudiadas.

A continuación se resume en la Tabla 4.7. los distintos pesos y volúmenes de los componentes de cada amasada teniendo en cuenta los diferentes porcentajes estudiados.

Muestras	Poda		Arena		Agua	Cemento	Relación
	V(ml)	P(g)	V(ml)	P(g)	V(ml)	P(g)	c/a
0%	0	0	750	1350 ± 5	225 ± 1	450 ± 2	0,5
10%	75	22,9	675	1215 ± 5	225 ± 1	450 ± 2	0,5
25%	187,5	57,25	562,5	1012,5 ± 5	225 ± 1	450 ± 2	0,5
50%	375	114,5	375	675 ± 5	180 ± 1	450 ± 2	0,4

Tabla 4.7. Peso de los componentes equivalente a los porcentajes en volumen

La densidad de la poda se obtuvo dividiendo la masa entre el volumen ocupado.

La poda de olivo triturada se trata previamente de dos maneras distintas para comprobar cuál de los dos caminos es más eficiente para conseguir una mayor mineralización. En el primer caso se sumerge la poda triturada en agua (Figura 4.7), mientras que en el segundo se sumerge en una disolución acuosa del 10% de hidróxido cálcico (Figura 4.8), ambos durante un periodo de 24 horas para asegurar la saturación de la poda. De aquí en adelante, para diferenciar las probetas sumergidas en agua de las sumergidas en la disolución acuosa, se considerará que las primeras no se han sometido a ningún tratamiento, mientras que las segundas han sido tratadas.



Figura 4.7. Poda saturada en agua



Figura 4.8. Poda saturada con tratamiento

La nomenclatura de las probetas se va a realizar de la siguiente manera: en primer lugar aparece la letra 'M', que representa la palabra Mortero, para especificar que se trata de este tipo de mezcla. En el caso de contener poda de olivo triturada, a continuación aparece la letra 'P' para denotar esta característica, seguida del porcentaje en tanto por ciento de poda de oliva sustituida en la mezcla. Después se pone el tiempo de curado de la probeta, que en este caso es 7 o 28 días. En los casos concretos de las probetas que han sido tratadas con anterioridad, se les añade al final las siglas 'ct' para denotar dicha característica. (Por ejemplo: M28 - Mortero control de 28 días de curado; MP507ct - Mortero con 50% de poda sustituida de 7 días de curado).

4.4. Caracterización de morteros

4.4.1. Variación dimensional

La variación volumétrica en mezclas de morteros a edad temprana se debe al efecto de la retracción química, que representa la cantidad de agua absorbida debido a la reacción química del cemento. Esta absorción de agua se aprecia a través del cambio volumétrico debido al efecto de autodesecación producido por el cemento. Su desarrollo depende de la relación de agua-cemento de la mezcla y de grado de hidratación, pues para relaciones de agua-cemento altas, la hidratación es más rápida y la retracción se acentúa los primeros días, alcanzando al completar la hidratación los mismos valores que para relaciones bajas.

Este efecto es global, y se manifiesta a través de una reducción en las dimensiones externas de la probeta, por lo que se llama retracción química volumétrica.

En la Tabla 4.8 y Figuras 4.9 y 4.10 se recogen los resultados obtenidos de contracción volumétrica de las probetas de mortero. En la tabla se puede apreciar que ninguna probeta ha alcanzado un valor superior al 0,4 % de contracción, sin diferir mucho de la probeta control, por lo que la adición de poda de olivo no afecta significativamente la contracción volumétrica de los morteros.

Probeta	7 días	Desviación típica	28 días	Desviación típica
M0	0,31	± 0,02	0,30	± 0,06
MP10	0,27	± 0,05	0,30	± 0,06
MP10ct	0,31	± 0,04	0,31	± 0,05
MP25	0,13	± 0,02	0,39	± 0,02
MP25ct	0,08	± 0,02	0,22	± 0,02
MP50	0,21	± 0,18	0,10	± 0,04
MP50ct	0,10	± 0,03	0,05	± 0,05

Tabla 4.8. Contracción volumétrica en tanto por ciento

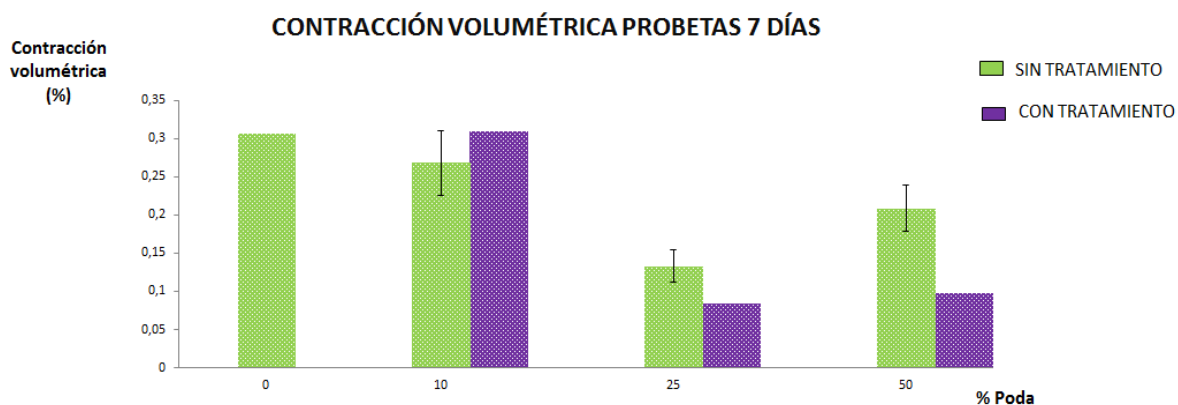


Figura 4.9. Contracción volumétrica en probetas de 7 días de curado

Se puede observar que para un proceso de curado de 7 días, las probetas que incorporan poda de olivo, con o sin tratamiento, presentan una contracción volumétrica inferior a la probeta control, excepto para los morteros con un contenido del 10 % de poda con tratamiento. Por otro lado, también resulta interesante destacar la mínima contracción volumétrica que sufren las probetas con agregados de poda de olivo tratada del 25 y 50 % en volumen.

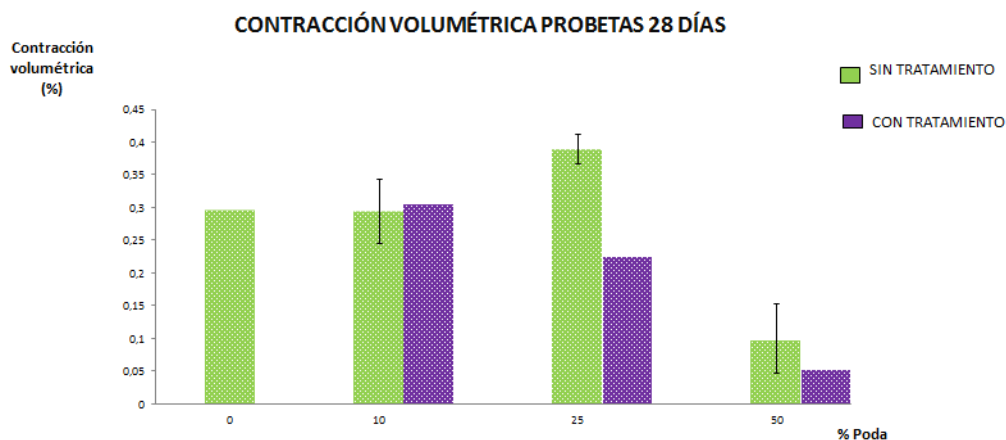


Figura 4.10. Contracción volumétrica en probetas de 28 días de curado

En lo que respecta a la influencia del tiempo de curado, la probeta control apenas sufre contracción (un 0,01 %) cuando el tiempo de curado se incrementa hasta 28 días lo que indica una contracción más acusada en la primera semana de curado. Las muestras de mortero que incorporan un 10 % de agregado de poda de oliva sin tratamiento presentan un comportamiento similar. Sin embargo, en las matrices con un 25 % de agregado de poda, con y sin tratamiento, se aprecia un incremento muy importante del porcentaje de reducción volumétrica.

En general, se aprecia una disminución en el volumen de las probetas tras el proceso de curado debido a la aportación de agua durante el proceso de curado de las probetas.

Unos valores de contracción volumétricos pequeños son favorables, debido a que la formación de grietas se debe principalmente a una contracción brusca del volumen del mortero.

4.4.2. Absorción de agua por capilaridad

La capacidad de un mortero para atraer y retener el agua en el interior depende de la cantidad y configuración de su porosidad (tamaño e interconexión de poros), de modo que el estudio de la absorción de agua por capilaridad puede ser una indicación de la estructura capilar del material. Si el mortero es permeable al agua, se transferirá al interior causando la aparición de humedad por filtración.

En la Tabla 4.9 y Figuras 4.11 y 4.12 se presentan los datos del coeficiente de absorción de agua por capilaridad, expresado en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$.

Probeta	7 días	Desviación típica	28 días	Desviación típica
M0	0,23	± 0,02	0,12	± 0,01
MP10	0,13	± 0,02	0,12	± 0,01
MP10ct	0,16	± 0,02	0,13	± 0,01
MP25	0,25	± 0,02	0,26	± 0,04
MP25ct	0,15	± 0,02	0,17	± 0,03
MP50	0,51	± 0,07	0,17	± 0,08
MP50ct	0,46	± 0,04	0,54	± 0,06

Tabla 4.9. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad

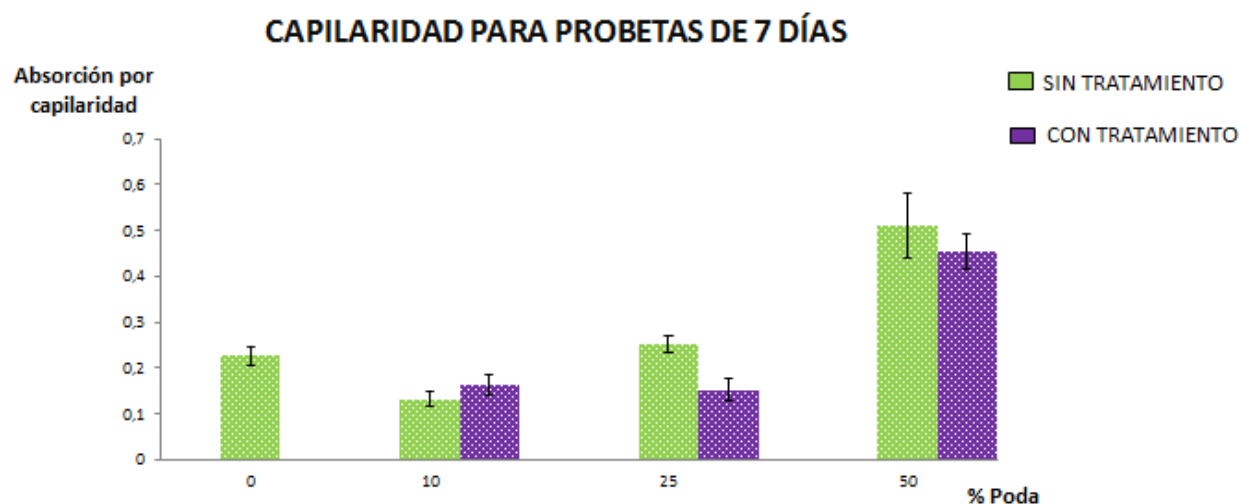


Figura 4.11. Absorción por capilaridad en probetas de 7 días de curado

En la Figura 4.11 se observa que la adición de un 10 % en volumen de poda de olivo tratada y sin tratar, produce una disminución en la absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado, siendo menor para las muestras tratadas. El tratamiento con solución acuosa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hace que la biomasa sea más higroscópica. Sin embargo, las muestras con un contenido de poda de 50 % en volumen presentan una porosidad total superior a las muestras control.

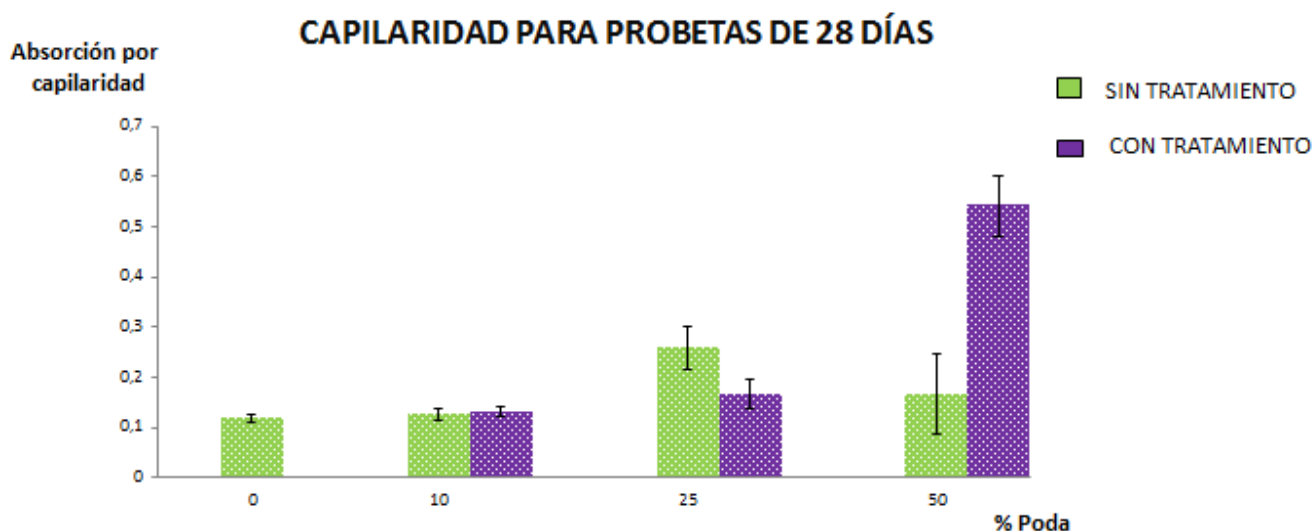


Figura 4.12. Absorción por capilaridad en probetas de 28 días de curado

Para las muestras de mortero control, la absorción de agua por capilaridad disminuye un 49% con el tiempo de curado, lo que indica que después de los 7 días

de curado se continúan formando silicatos de calcio hidratado, lo que trae consigo que la red de poros sea más compacta.

La absorción de agua por capilaridad de los morteros que contienen el 10 y 25 % en volumen de poda de olivo es similar a los dos tiempos de curado. Con la adición del 50 % en volumen de poda sin tratamiento se ha producido una disminución considerable del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. Sin embargo, para la probeta de mortero con un 50 % en volumen de poda tratada, se obtiene un valor máximo de porosidad a los 28 días de curado.

4.4.3. Densidad aparente

La densidad del mortero depende fundamentalmente de la densidad de sus componentes: arena y poda de olivo, así como de la granulometría y el volumen que ocupen en su dosificación. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento del mortero. A medida que aumenta dicha relación, más poroso es el mortero.

En la Tabla 4.10 y en las figuras 4.13 y 4.14 se recogen los datos de densidad aparente en kg/m^3 de las probetas estudiadas.

Probeta	7 días	Desviación típica	28 días	Desviación típica
M0	2160	± 4	2270	± 3
MP10	2060	± 9	2030	± 4
MP10ct	2070	± 9	2170	± 6
MP25	1840	± 42	1850	± 5
MP25ct	1920	± 12	1980	± 11
MP50	1490	± 6	1400	± 3
MP50ct	1400	± 4	1690	± 4

Tabla 4.10. Densidad aparente de las probetas ensayadas

En general, la densidad aparente de los morteros en estado endurecido disminuye con el contenido en poda de olivo triturada. Esta disminución de la densidad aparente puede deberse a la menor densidad aparente del agregado poda de olivo, 305 kg/m^3 , con respecto a la de la arena, 1800 kg/m^3 . En la Tabla 4.7, se observa, que a medida que se incrementa el contenido en poda de olivo, hay una

menor demanda de agua para conseguir una plasticidad adecuada, que puede ser debido al exceso de agua añadida a la mezcla por la saturación de la poda. Es decir, se requiere una demanda de agua menor para lograr una plasticidad adecuada de la mezcla, este exceso de agua al evaporarse genera más porosidad, por lo que disminuye la densidad aparente.

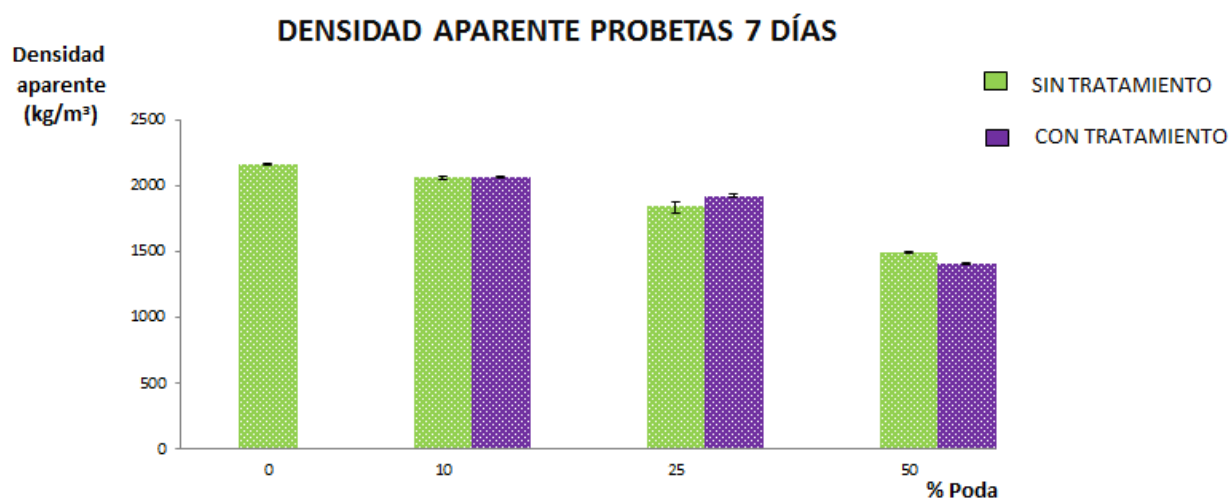


Figura 4.13. Densidad aparente en probetas de 7 días de curado

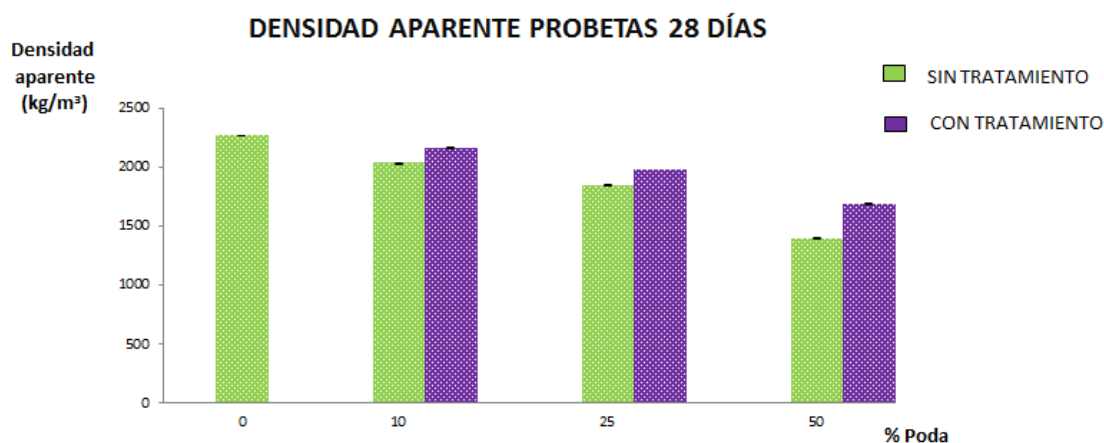


Figura 4.14. Densidad aparente en probetas de 28 días de curado

A los 28 días de curado, los morteros estándar tienen una densidad aparente de 2267 kg/m^3 , disminuyendo la densidad aparente en un 38,4 % y un 25,6 % con la adicción de un 50 % de volumen de poda sin tratar y tratada respectivamente.

En todos los casos, la densidad aparente de los morteros que incorporan la poda de oliva tratada es mayor que la densidad de los morteros que incorporan poda sin tratar que no ha sido tratada, lo que puede ser debido al mayor carácter higroscópico de la biomasa tratada causada por su mineralización.

Teniendo en cuenta que la densidad aparente máxima para morteros ligeros es de 1300 kg/m^3 (UNE EN-998-2, 2012), no pueden considerarse morteros ligeros ninguna de las mezclas realizadas en este TFG.

4.4.4. Resistencia a Flexión

En la tabla 4.11 y en las figuras 4.15 y 4.16 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a flexión, en MPa, de las probetas de mortero estudiadas.

Probeta	7 días	Desviación típica	28 días	Desviación típica
M0	6,0	$\pm 0,4$	8,1	$\pm 0,6$
MP10	4,5	$\pm 0,7$	5,4	$\pm 0,3$
MP10ct	5,4	$\pm 0,3$	5,9	$\pm 0,3$
MP25	3,2	$\pm 0,3$	2,1	$\pm 0,2$
MP25ct	6,0	$\pm 2,6$	6,0	$\pm 0,5$
MP50	1,8	$\pm 0,3$	1,5	$\pm 0,1$
MP50ct	1,6	$\pm 0,3$	3,3	$\pm 0,5$

Tabla 4.11. Medias de resistencia a flexión de las probetas

Todos los morteros con agregado de poda de olivo triturada presentan una resistencia a la flexión menor que el mortero control.

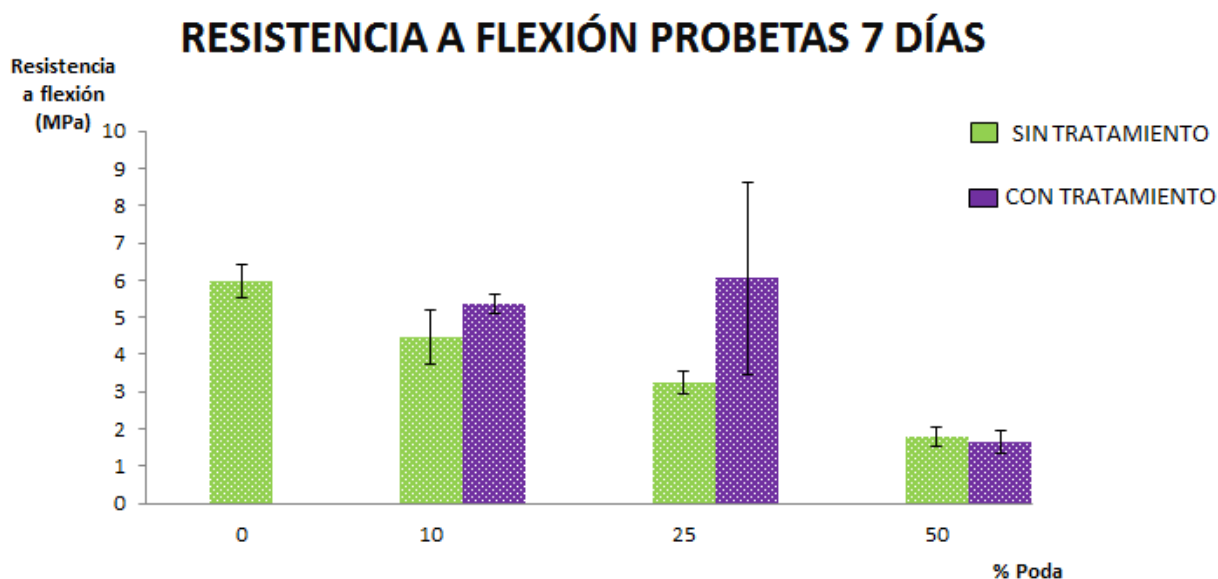


Figura 4.15. Resistencia a flexión en probetas de 7 días de curado

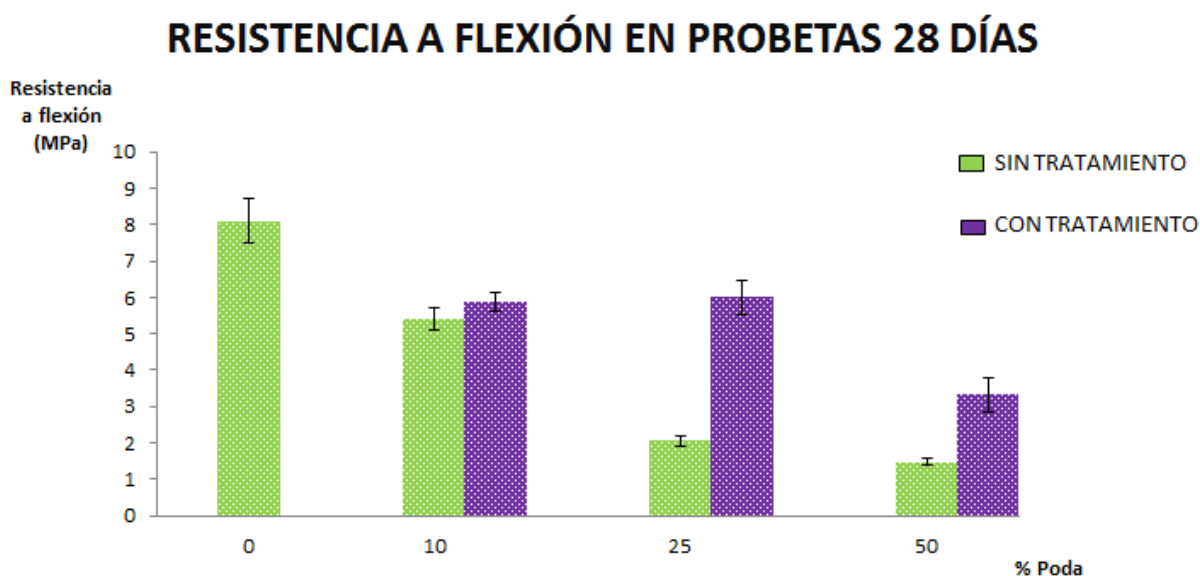


Figura 4.16. Resistencia a flexión en probetas de 28 días de curado

En las mezclas que incorporan poda no tratada, se observa una disminución progresiva en la resistencia a la flexión a medida que se incrementa el contenido en biomasa. Por ejemplo, para los morteros que contienen el 10 % en volumen de residuo de biomasa hay una disminución de la resistencia a flexión del 25 % a los 7 días de curado, siendo del 33 % a los 28 días de curado con respecto a los morteros control. Se aprecia un comportamiento similar para el resto de las incorporaciones.

También se observa que, excepto en el caso de sustitución de arena del 10 % en volumen por poda de olivo, la resistencia a flexión disminuye con el tiempo de curado, lo que indica que el residuo no se ha integrado durante el endurecimiento del cemento en el material, concentrando tensiones y empeorando las propiedades mecánicas.

En el caso de los morteros con poda de olivo tratada, la resistencia mecánica a flexión se incrementa con el tiempo de lo que podría indicar que la mineralización de la poda mejora la actividad puzolánica, integrando el material durante el endurecimiento de la mezcla, evitando disminuir las propiedades mecánicas.

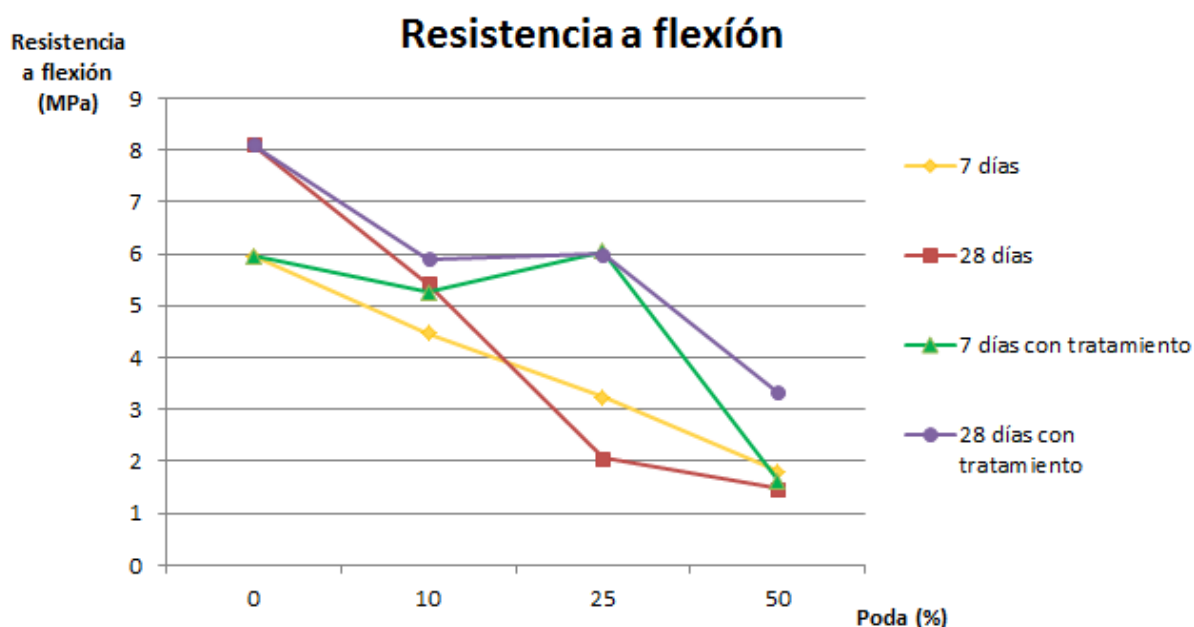


Figura 4.17. Tendencia de la resistencia a flexión en probetas

La resistencia a flexión sigue una tendencia diferente cuando al mortero se adiciona la poda triturada con y sin tratamiento. La adición de poda sin tratar disminuye progresivamente la resistencia a flexión al aumentar el porcentaje de agregado de biomasa vegetal, mientras que cuando se adiciona poda tratada la disminuye con un 10 % en volumen, aumenta con la adición de un 25 % incluso más que en mortero de referencia a los 7 días, para finalmente disminuir con la incorporación de un 50% en volumen (Figura 4.17).

4.4.5. Resistencia a Compresión

En la Tabla 4.12 y en las Figuras 4.18 y 4.19 se recogen los resultados de la resistencia a compresión en MPa de las probetas de mortero control y con distintas incorporaciones de poda tratada y sin tratar.

Probeta	7 días	Desviación típica	28 días	Desviación típica
M0	31,8	± 2,9	46,0	± 1,1
MP10	25,1	± 0,7	20,7	± 0,4
MP10ct	34,1	± 0,8	30,8	± 2,9
MP25	6,8	± 0,2	7,2	± 0,8
MP25ct	18,8	± 2,7	16,3	± 1,4
MP50	4,2	± 0,2	2,3	± 0,4
MP50ct	3,5	± 0,6	7,1	± 1,0

Tabla 4.12. Medias de resistencia a compresión de las probetas

Se observa una disminución de la resistencia a compresión con la incorporación de poda de olivo triturada, sin embargo, esta disminución es mucho menor en el caso de las probetas de mortero que incorporan poda tratada. Las partículas vegetales tienen una menor compatibilidad química con el cemento cuando no se someten a ningún tratamiento de mineralización. El tratamiento con una solución acuosa del 10% de Ca(OH)_2 tiene como fin la mineralización de la poda de olivo, permitiendo obtener mayores resistencias a la compresión debido a la mayor reacción entre el residuo y el cemento.

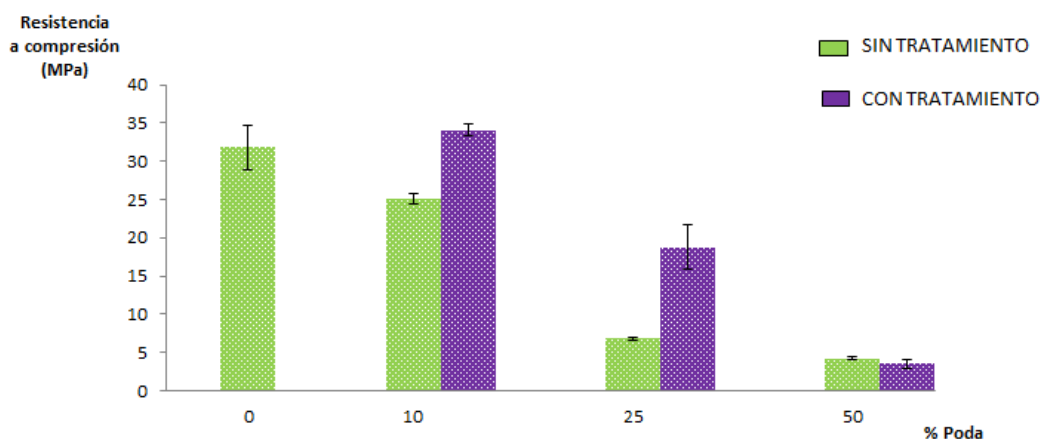
RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA 7 DÍAS

Figura 4.18. Resistencia a compresión en probetas de 7 días de curado

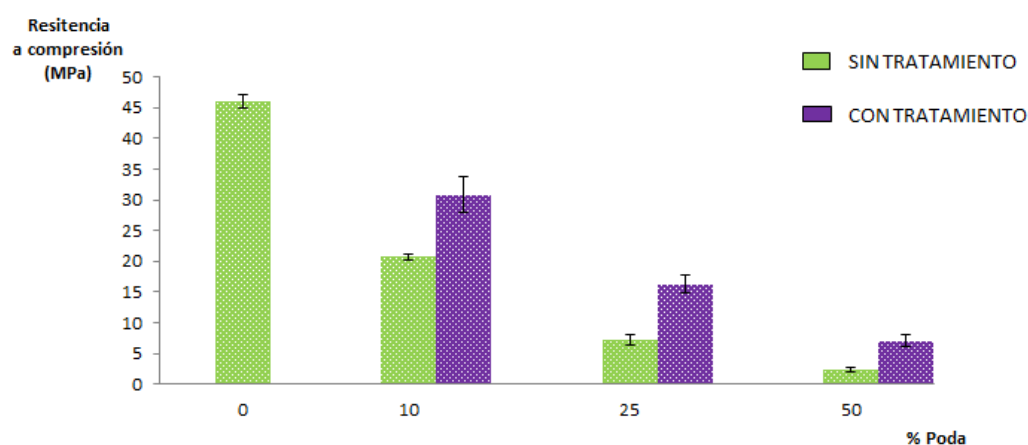
RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA 28 DÍAS

Figura 4.19. Resistencia a compresión en probetas de 28 días de curado

Los valores de la resistencia a compresión son inferiores a los 28 días de curado tanto en los morteros con adición de poda natural como sometida al tratamiento de mineralización con hidróxido cálcico. Al aumentar el tiempo de curado se observan cambios en el color y en la consistencia de los morteros que incorporan el residuo poda de olivo que indican una inadecuada integración del residuo en la mezcla. La reducción de la resistencia a la compresión a medida que se añaden mayores proporciones de biomasa puede atribuirse a la falta de adhesión de la interfaz de la poda, así como a la reducción de componentes capaces de generar silicatos de calcio hidratado, lo que produce una reducción en el volumen de material cementoso hidratado en el mortero.

En la Figura 4.20 se representan las tendencias de las probetas de 7 y 28 días de curado, con y sin tratamiento, en función del porcentaje en volumen de residuo agregado a la mezcla.

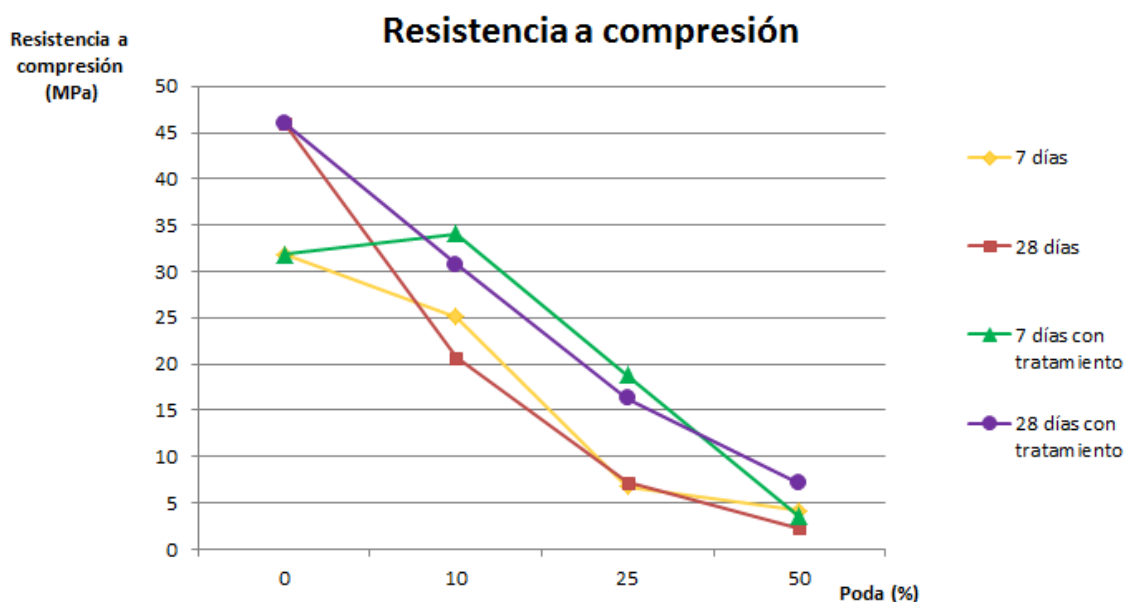


Figura 4.20. Tendencia de a resistencia a compresión en probetas

Los morteros tienen una mayor resistencia a compresión a los 7 días de curado, posiblemente debido a una mayor velocidad de reacción de la biomasa con el cemento.

La incorporación del 10 % en volumen de poda de olivo tratada no modifica la resistencia a compresión de las probetas de mortero curadas 7 días, mientras que para los morteros curados durante 28 días la resistencia a la compresión disminuye un 21 %. La pérdida de resistencia a la compresión tras 28 días de curado de las probetas de mortero con poda no tratada ha sido mucho mayor (48 %). Para las demás adiciones, hay una acentuada pérdida de propiedades.

La norma UNE-EN 998-1 (UNE-EN 998-1, 2010) establece una resistencia mínima a compresión de 6 MPa para su uso en juntas y en revestimientos. Por lo que, a excepción de los morteros con poda de olivo triturada no tratada que incorporan el 50 % en volumen de biomasa todos los morteros cumplen los requisitos de diseño.

el mortero que incorpora un 10 % en volumen de residuo, presenta propiedades físicas y mecánicas similares a las que presentan los morteros control.

4.4.6. Microscopía esteroscópica

La calidad de la interfase entre el de cemento y las partículas de poda de olivo tratadas (Figura 4.21) y no tratadas (Figura 4.22) se ha observado mediante un microscopio estereoscópico. En las micrografías se observa una mejor adherencia en la interfaz de la poda de oliva tratada, probablemente debido a la efectividad del proceso de mineralización de la madera llevado a cabo por la solución enriquecida con hidróxido de calcio. Los poros observados son más pequeños y la proporción de poros abiertos en los morteros de poda de olivo tratados son menores, lo que da como resultado una mayor resistencia a la compresión.

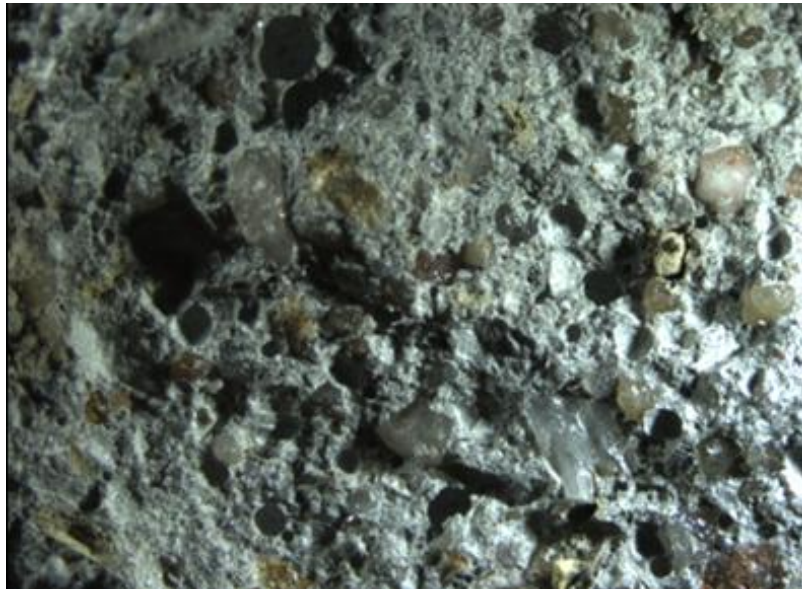


Figura 4.21. Interfase de mortero con tratamiento

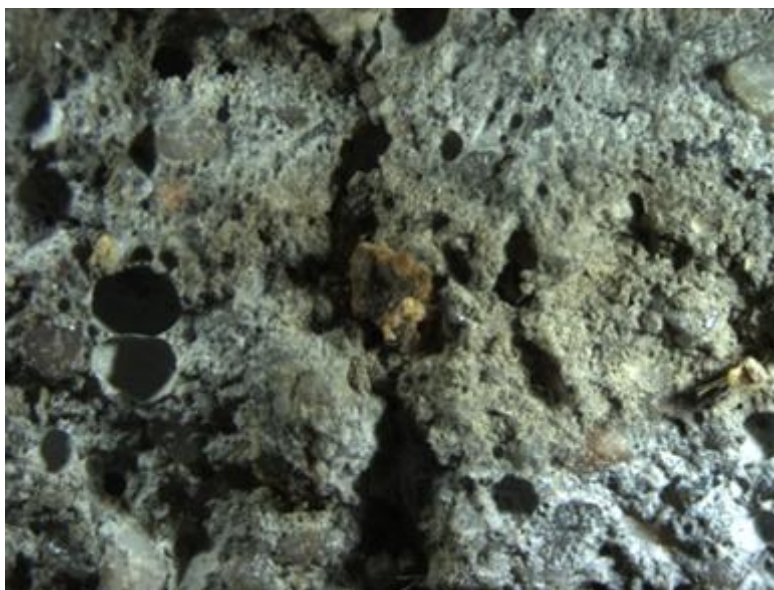


Figura 4.22. Interfase de mortero sin tratamiento

4.5. Estudio económico

Resulta interesante realizar una comparación económica de una amasada de mortero común sin reemplazos con las composiciones estudiadas en este TFG.

Como en la actualidad no existe mercado de los residuos de la poda de olivo, no se puede saber con exactitud un precio medio por tonelada de material, pero puede calcularse su precio de manera indirecta a través del cálculo de la mano de obra y alquiler de la maquinaria.

Mediante la base de precios establecidos para contratación y maquinaria de la Junta de Andalucía se ha estimado el precio por tonelada de residuo de poda de olivo triturada. En la Tabla 4.13 se resume el coste en euros por cada metro cúbico de mortero.

	€/tn	Densidad (tn/m ³)	€/m ³
Cemento	96,81	1,1	106,25
Arena	14,75	1,8	26,55
Poda de olivo	45	0,305	13,72
Agua	1,27	1	1,27

Tabla 4.13. Coste de los componentes del cemento

A continuación se desarrolla un desglose de precios en los que se compara el coste de cada probeta estudiada en función de su composición. La cantidad de cemento no varía, por lo que su precio va a permanecer constante durante todo el estudio económico. En las Tablas 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 se desarrollan los precios por metro cúbico de mortero, teniendo en cuenta la composición volumétrica de cada mezcla.

M0	Porcentaje	Coste (€/tn)	Precio (€)
Cemento	0,296	106,25	31,40
Agua	0,163	1,27	0,21
Arena	0,542	26,55	14,39
Poda	0	13,72	0
			46,00 €

Tabla 4.14. Coste por metro cúbico de mortero control

M10	Porcentaje	Coste (€/tn)	Precio (€)
Cemento	0,296	106,25	31,40
Agua	0,163	1,27	0,21
Arena	0,488	26,55	12,95
Poda	0,054	13,72	0,74
			45,30 €

Tabla 4.15. Coste por metro cúbico de mortero con 10% de poda de olivo

M25	Porcentaje	Coste (€/tn)	Precio (€)
Cemento	0,296	106,25	31,40
Agua	0,163	1,27	0,21
Arena	0,406	26,55	10,79
Poda	0,135	13,72	1,86
			44,26 €

Tabla 4.16. Coste por metro cúbico de mortero con 25% de poda de olivo

M50	Porcentaje	Coste (€/tn)	Precio (€)
Cemento	0,296	106,25	31,40
Agua	0,130	1,27	0,17
Arena	0,271	26,55	7,19
Poda	0,271	13,72	3,72
			42,48 €

Tabla 4.17. Coste por metro cúbico de mortero con 50% de poda de olivo

Se puede observar que el precio por metro cúbico de mortero va reduciéndose ligeramente con el aumento de porcentaje de agregado de poda de olivo triturada a la mezcla. Estos precios han sido calculados para las probetas que no han sido tratadas, debido a que no se puede calcular la cantidad de disolución necesaria para un metro cúbico de mortero por la variabilidad de la absorción de disolución acuosa de la poda según la región, el clima o el tiempo de almacenaje. Sin embargo, extrapolando datos experimentales de la fabricación en el laboratorio, y conociendo el precio del hidróxido cálcico que es de 0,15 €/kg, se realiza un desglose de precios en la Tabla 4.18.

Probeta	Coste (€/m ³)
M10	45,58
M25	44,75
M50	43,05

4.18. Coste por metro cúbico de mortero de mezclas con tratamiento

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados experimentales obtenidos para las probetas de mortero que incorporan como agregado poda de olivo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La densidad aparente de los morteros que incorporan poda de olivo triturada disminuye a medida que aumenta el volumen de biomasa, debido a la menor densidad aparente de la poda de olivo con respecto a la arena. La densidad aparente de los morteros que incorporan poda de olivo tratada es mayor que la de los morteros que incorporan poda de olivo natural, sin someterse a ningún tratamiento, lo que puede ser debido a que el proceso de mineralización de la biomasa, hace que la poda de olivo tenga un carácter higroscópico mayor. Todas las muestras estudiadas tienen una densidad aparente superior a 1300 kg/m^3 , por lo que ningún mortero estudiado puede considerarse mortero aligerado.
- El ensayo de absorción de agua por capilaridad indica un aumento de la porosidad en el mortero a lo largo de su proceso de curado, siendo mayor en los morteros sin tratamiento, como se ha confirmado con ayuda del microscopio estereoscópico.
- Los morteros que contienen poda de olivo sometida al tratamiento de mineralización han presentado propiedades mecánicas más adecuadas que las que no se someten al tratamiento. La adición de un 50 % en volumen de poda de olivo triturada ha producido una drástica disminución de las propiedades mecánicas de los morteros. Sin embargo, todos los morteros que incorporan poda de oliva tratada con una solución del 10 % de hidróxido cálcico cumplen la normativa en cuanto a resistencia a compresión, mientras que solo las mezclas del 10 y 25 % en volumen de poda triturada natural, sin tratamiento, se puede adicionar para obtener propiedades mecánicas que cumplan con los estándares.
- El porcentaje óptimo de incorporación de biomasa es del 10 % en volumen de poda de olivo tratada, ya que a los 28 días de curado, se alcanzan valores de resistencia a compresión similares a los obtenidos para los morteros control, presentando valores similares de absorción de agua por capilaridad, disminuyendo ligeramente la densidad aparente del mortero.
- La reutilización de la poda de olivo como agregado de morteros produce un importante beneficio ambiental, ya que el volumen de mortero

empleado en un edificio implica un gran volumen de biomasa reciclada. El reciclaje es un valor añadido frente a su posible uso como combustible o su uso como compost.

- El coste de las mezclas de mortero sostenibles disminuye a medida que aumenta el porcentaje de poda de olivo sustituido, por lo que las probetas del 10 %, 25 % y 50 % en volumen de biomasa tienen un precio menor que el mortero control. Las mezclas con incorporaciones de poda pretratada han resultado ser ligeramente más caras por la adición de la disolución acuosa de hidróxido cálcico, aunque su precio sigue siendo ligeramente más económico que el del mortero control.

6. BIBLIOGRAFÍA

- *Agarwal S. Actividad puzolánica de diversos materiales silíceos (2006). Cem Concr Res, 36, 1735-1739.*
- *Agencia andaluza de la energía. La biomasa en Andalucía (2016). Consejería de empleo, empresa y comercio. Junta de Andalucía.*
- *ASTM C150 / C150 - M17, Standard Specification for Portland Cement, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2017*
- *ASTM C91 / C91 M-12. Standard Specification for Masonry Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.*
- *Bederina M., Marmoret L., Mezreb K., Khenfer M.M., Bali A., Queneudec M., Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of the sand concretes – experimental study and modelling, Construction and Building Materials 21 (3) (2007) 662–668.*
- *BOE, Real Decreto 661/2007 de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.*
- *Bodirlau R., Teaca CA., Spiridon I. Preparation and characterization of composites comprising modified hardwood and wood polymers/poly (vinyl chloride) BioResources 4849 (2009) 1285-1304.*
- *Bouguerra O., Amiri A., Aït-Mokhtar A., Diop M.B., Water sorptivity and pore structure of wood cementitious composites, Magazine of Concrete Research 54 (2) (2002),103–112.*
- *Bye G.C. Portland cement: composition, production and properties. 2ª ed. London: Thomas Telford (1999).*

- Cai L. *Experimental research on producing thermal insulating bonding mortar by spent polystyrene foam. Cement and Concrete Composites* 174-177 (2012) 1253-1257.
- Cebrián J.L., Pisonero F. *Determination of specific surface by Blaine's method in the case of flying ashes and pozzolan cements* (1971).
- Chen P.W., Chung D. D. L.. *A comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement by latex addition. A review. ACI Materials Journal* 93 (2) (1996) 129-133.
- Colleparidi M.. *The New Concrete. Grafiche Tintoretto, Treviso, Italy, 2006, p. 115.*
- Corinaldesi V., Alida Mazzoli A., Siddique R. *Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. Construction and Building Materials* 123 (2016) 281-289.
- Corinaldesi V., Mazzoli A., Moriconi G. *Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. Materials and Desing* 32 (3) (2011) 1646–1650.
- Corinaldesi V., Moriconi G.. *Use of synthetic fibers in self-compacting lightweight aggregate concretes. Journal of Building Engeneering* 4 (2015) 247–254.
- Ebensperger L., Breitenbücher R., Springenschmid R. *Early age volume changes in concrete due to chemical shrinkage of cement paste. Universidad Técnica de Munich* (1991).
- Gouny F., Fouchal F., Maillard P., Rossignol S.. *A geopolymer mortar for wood and earth structures. Construction and Building Materials* 36 (2012)188-195.
- Mateo S., Puentes J.G., Sánchez S., Moya A.J. *Oligosaccharides and monomeric carbohydrates production from olive tree pruning biomass. Carbohydrate Polymers*, 93, 416–423 (2013).
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) 2014.
- Mirabella G., Battiston S., Diamond ME. *Integration of multiple-whisker inputs in rat somatosensory cortex. Cereb Cortex* (2001).
- Sanchez de Guzman D. *Tecnología del concreto y del mortero. 5ª ed. Colombia: Bhandar editores* (2001).
- Sanjuán B. M., Chinchón Y.S. *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland* (2014).
- Schackow A., Stringari D., Senff L., Correia S.L., Segadães A.M. *Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. Cement & Concrete Composites* 62 (2015) 82-89.

- *Simatupang M.H., Schawarz H.G., Broker F.W. Small scale plants for the manufacture of mineral-bonded wood composites. In. 8 th Word Forestry Congress, Jakarta (Indonesia) (1978) 98-120.*
- *Taylor H.F.W. La química de los cementos. Traducido por Romero Rossi, F.; Fernández, J. A. 2 v. Bilbao: Urmo (1978).*
- *Turgut P., Algin H.M., Limestone dust and wood sawdust as brick material. Building Environmental 42 (9) (2007) 3399–3403.*
- *UNE-EN 13139:2003. Áridos para morteros.*
- *UNE-EN 196. Método 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 934-2:2010. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad marcado y etiquetado.*
- *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*
- *Zhang, T., Zhou, Q., Ogmundsdottir, M.H., Möller, K., Siddaway, R., Larue, L., Hsing, M., Kong, S.W., Goding, C.R., Palsson, A., Steingrimsson, E., Pignoni, F. Mitf is a master regulator of the v-ATPase, forming a control module for cellular homeostasis with v-ATPase and TORC1 (2015).*

PÁGINAS WEB VISITADAS:

<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Valorizacion%20de%20residuos%20de%20biomasa%20en%20la%20industria.pdf>

<http://www.aridos.org/mineria-sostenible/>

<http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2014/12/19/produccion-de-aridos/#more-1077>

<https://previa.uclm.es/users/higuera/MAM/MMAM1.htm>

<http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2014/12/19/produccion-de-aridos/#more-1077>

<https://previa.uclm.es/users/higuera/MAM/MMAM1.htm>