



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

UTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA MADERA PARA LA FABRICACIÓN DE MORTEROS SOSTENIBLES

Alumno: Fátima Chamorro Bonilla

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

Dpto: Ingeniería Química, Ambiental y de los
Materiales

Septiembre, 2018



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

Doña MARÍA DOLORES LA RUBIA GARCÍA y Doña DOLORES ELICHE QUESADA, tutoras del Proyecto Fin de Carrera titulado: UTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DE LA MADERA PARA LA FABRICACIÓN DE MORTEROS SOSTENIBLES, que presenta FÁTIMA CHAMORRO BONILLA, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2018

La alumna:

FÁTIMA CHAMORRO BONILLA

Las tutoras:

MARÍA DOLORES

LA RUBIA GARCÍA

DOLORES

ELICHE QUESADA

RESUMEN

Con el fin de aprovechar la gran cantidad de residuos que produce la industria de la madera se propone en este Trabajo Fin de Grado (TFG) la valorización de serrín como sustituto de la arena en la fabricación de morteros de cemento Portland más ligeros y rentables.

En este TFG se han estudiado las propiedades físicas y mecánicas de morteros que incorporan como sustituto de la arena diferentes porcentajes de serrín: 0, 5, 10, 15 y 20 % en volumen, sin pretratar y pretratado con una disolución acuosa del 10 % de hidróxido de calcio para lograr una mayor mineralización del residuo a tiempos de curado de 7 y 28 días.

Una vez caracterizadas las materias primas se procede a la caracterización física de los morteros mediante la determinación de la densidad aparente y del coeficiente de absorción de agua por capilaridad y a la caracterización mecánica mediante la realización de ensayos de resistencia a flexión y compresión.

Los resultados indican que la incorporación de serrín pretratado y sin pretratar mejora las propiedades físicas de los materiales de construcción obteniendo morteros con menor densidad aparente y menor absorción de agua por capilaridad, disminuyendo las propiedades mecánicas de resistencia a flexión y compresión a medida que se incrementan mayores cantidades de residuo. Los mejores valores se obtienen con la incorporación del 5 % de serrín pretratado. La resistencia a flexión, la resistencia a la compresión y la densidad aparente en seco apenas se modifica con el tiempo de curado, mientras que la absorción de agua por capilaridad se incrementa ligeramente con el tiempo de curado.

El estudio económico indica que a medida que se incorporan cantidades crecientes de residuos de madera el precio por metro cúbico de mortero de cemento disminuye, por lo que su empleo supone beneficios económicos además de los beneficios ambientales que implica el empleo de un residuo como materia prima.

ABSTRACT

In order to take advantage of the great quantity of residues that produces the wood industry this Work End of Degree (TFG) is proposed to evaluate the use of sawdust as substitute of the sand in the manufacture of lighter Portland cement mortars.

In this TFG the physical and mechanical properties of the mortars that incorporate sawdust as substitute of the sand (0, 5, 10, 15 and 20 % in volume) have been studied. The sawdust was used in two forms: without pretreatment and pretreated with an aqueous solution of calcium hydroxide (10%) to achieve a major mineralization of the residue after 7 and 28 days of curing.

After the characterization of the raw materials, the mortars were characterized by means of the determination of the apparent density and of the coefficient of water absorption by capillarity, bending strenght and compression tests.

The results indicate that the incorporation of sawdust and pretreated sawdust improves the physical properties of the construction materials obtaining mortars with minor apparent density and minor absorption of water by capillarity. In addition, the mechanical properties, bending and compression strenght, decrease with the sawdust additions. The best values are obtained by the incorporation of 5 % of sawdust pretreated. The bending and compression strenght, and the apparent density in dry are barely modified by the time of treated, whereas the water absorption by capillarity slightly increases with the time of treated.

The economic study indicates that as the quantity of sawdust increases in the mortar the price diminishes. For this reason, the use of this waste implies economic and environmental benefits.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Características del mortero	8
1.2. Materias primas empleadas en la fabricación de morteros	13
1.3. Cemento Portland	13
1.3.1. Clínter	13
1.3.2. Proceso de fabricación del cemento.....	14
1.3.3. Hidratación del cemento.....	15
1.3.4. Tipos de cemento.....	16
1.4. Áridos.....	17
1.4.1. Tipos de áridos.....	17
1.4.2. Propiedades físicas de los áridos	18
1.5. Agua	21
1.6. Aditivos	22
1.6.1. Tipos de aditivos	22
1.7. Serrín	25
1.7.1. Proceso fabricación tableros MDF.....	28
1.7.2. Uso de residuos de madera en la fabricación de morteros	29
2. OBJETIVOS	31
3. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. Materiales	31
3.2. Procesos de caracterización de las materias primas	33
3.2.1. Humedad y materia volátil.....	33
3.2.3. Distribución granulométrica.....	34
3.2.4. Análisis elemental (CHNS-O).....	34
3.2.5. Fluorescencia de rayos X (FRX)	34
3.2.6. Caracterización mineralógica (DRX)	35
3.2.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	35
3.3. Elaboración de probetas de mortero	36
3.3.1. Requisitos para la fabricación de morteros	36
3.3.2. Proceso de fabricación de las probetas de mortero	37
3.4. Ensayos físicos	40
3.4.1. Determinación de la densidad aparente	40
3.4.2. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.....	42

3.5. Ensayos de resistencias mecánicas.....	45
3.5.1. Resistencia a flexión.....	45
3.5.2. Resistencia a la compresión.....	47
4.1. Caracterización de las materias primas	49
4.1.1. Caracterización del cemento Portland	49
4.1.1.1. Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa	49
4.1.1.2. Distribución granulométrica	50
4.1.1.3. Análisis elemental (CHNS-O)	51
4.1.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	52
4.1.1.5. Caracterización mineralógica (DRX).....	52
4.1.1.6. Caracterización microestructural (SEM)	53
4.1.2. Caracterización del serrín.....	54
4.2. Composición de las mezclas	54
4.3. Caracterización de los morteros.....	56
4.3.1 Absorción de agua por capilaridad	56
4.3.2. Densidad aparente	59
4.3.3. Resistencia a flexión.....	62
4.3.4. Resistencia a la compresión.....	65
4.4. Estudio económico.....	68
5. CONCLUSIONES	72
Bibliografía	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de consistencia en función del escurrimiento	9
Tabla 2. Tipos de mortero según la densidad	12
Tabla 3. Tipos de cemento	17
Tabla 4. Límites superior e inferior del tamaño de árido según EN: 13139:2002	19
Tabla 5. Peso para cada uno de los componentes del mortero en función del porcentaje de serrín	38
Tabla 6. Valores característicos del cemento Portland	50
Tabla 7. Distribución de tamaño del cemento Portland	51
Tabla 8. Análisis elemental (CNHS-O) de los residuos	52
Tabla 9. Composición química del cemento Portland	52
Tabla 10. Peso de los componentes equivalentes a los porcentajes en volumen	55
Tabla 11. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad	57
Tabla 12. Clasificación de los morteros según la norma UNE-EN 998-1	59
Tabla 13. Densidad aparente de las probetas ensayadas	60
Tabla 14. Medias de resistencia a flexión de las probetas	62
Tabla 15. Medias de resistencia a compresión de las probetas	65
Tabla 16. Coste de los componentes del cemento	69
Tabla 17. Coste por metro cúbico del mortero de control	69
Tabla 18. Coste por metro cúbico de mortero con 5% de serrín	69
Tabla 19. Coste por metro cúbico de mortero con 10% de serrín	70
Tabla 20. Coste por metro cúbico de mortero con 15% de serrín	70
Tabla 21. Coste por metro cúbico de mortero con 20% de serrín	70
Tabla 22. Coste por metro cúbico de mortero con 5% de serrín tratado	71
Tabla 23. Coste por metro cúbico de mortero con 10 % serrín tratado	71
Tabla 24. Coste por metro cúbico de mortero con 15% de serrín tratado	71
Tabla 25 . Coste por metro cúbico de mortero con 20% de serrín tratado	71

Indice de Figuras

Ilustración 1. Proceso de fabricación del cemento Portland	15
Ilustración 2. Límites granulométricos de las arenas para morteros de uso general según la norma BS 1200:1976	20
Ilustración 3. Mapa industrias de la madera en España	28
Ilustración 4. Proceso fabricación tableros MDF	29
Ilustración 5. Materiales empleados en la fabricación de probetas	32
Ilustración 6. Secado del serrín después del tratamiento	33
Ilustración 7. Equipo de microscopía electrónica de barrido	36
Ilustración 8. Moldes	37
Ilustración 9. Máquina amasadora	39
Ilustración 10. Resultado final de las probetas en el molde	40
Ilustración 11. Balanza hidrostática	42
Ilustración 12. Ensayo capilaridad	44

Ilustración 13. Máquina resistencia a flexión	46
Ilustración 14. Ensayo resistencia a flexión	47
Ilustración 15. Máquina ensayo compresión.....	49
Ilustración 16. Distribución de tamaño de partícula del cemento Portland	51
Ilustración 17. DRX del cemento Portland	53
Ilustración 18. Imágenes SEM-EDAX del CP (4.5 Kx)	54
Ilustración 19. Nomenclatura usada en las probetas	56
Ilustración 20. Absorción de agua por capilaridad en probetas de 7 días de curado.....	58
Ilustración 21. Absorción de agua por capilaridad en probetas de 28 días de curado.....	58
Ilustración 22. Densidad aparente en probetas de 7 días de curado	60
Ilustración 23. Densidad aparente en probetas de 28 días de curado	61
Ilustración 24. Resistencia a flexión en probetas de 7 días de curado.....	63
Ilustración 25. Resistencia a flexión en probetas de 28 días de curado.....	64
Ilustración 26. Tendencia de la resistencia a flexión en probetas	64
Ilustración 27. Resistencia a compresión en probetas de 7 días de curado.....	66
Ilustración 28. Resistencia a compresión en probetas de 28 días de curado.....	67
Ilustración 29. Tendencia de la resistencia a compresión en probetas	67
Ilustración 30. Comparación de precios de las probetas con y sin tratamiento	72

1. INTRODUCCIÓN

Los morteros se definen como mezclas de uno o más aglomerantes inorgánicos, cemento, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos.

Contrariamente a otros materiales constructivos, el mortero tiene la peculiaridad de ser empleado en muy distintas aplicaciones en edificación. Estas posibilidades vienen determinadas por los siguientes factores.

- Adaptabilidad formal. El mortero se puede adaptar a cualquier superficie y volumen, forma e intersticio. Tampoco requiere tolerancias dimensionales.
- Facilidad de aplicación. A diferencia de otros materiales los morteros no requieren especial sofisticación para su puesta en obra. Pueden ser aplicados manualmente o por proyección.
- Prestaciones diseñables. El mortero ofrece la posibilidad de adaptar sus propiedades a las exigencias que se deseen conforme a la composición y dosificación precisas. (Rodríguez-Mora,2003)

Dentro de las prestaciones que ofrece un mortero debemos distinguir dos etapas según su estado físico, que se denominan estado fresco y estado endurecido. La etapa de estado fresco corresponde a la fase del mortero después de ser mezclado y amasado. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable. Después de esta fase el mortero endurece hasta solidificarse.

Las propiedades referidas al estado fresco influirán principalmente en el rendimiento y la calidad de la ejecución, en cambio las propiedades son estipuladas por las prescripciones del proyecto y por el cumplimiento de las exigencias de los reglamentos y normativas.

1.1. Características del mortero

Características del mortero fresco

- Consistencia

Se define como la trabajabilidad del mortero. Este se consigue añadiendo cierta cantidad de agua según la granulometría del mortero. La consistencia se determina mediante la mesa de sacudidas de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-3 (UNE-EN 1015-3,2000).

El valor de la consistencia viene dado por el escurrimiento que se define como el valor medio del diámetro en mm. Se tiene tres tipos de consistencia en función del escurrimiento (Tabla 1).

Mortero fresco	Consistencia	Designación
Seco	<140	S
Plástico	140 a 200	P
Fluido	>200	F

Tabla 1. Tipos de consistencia en función del escurrimiento

Como la consistencia depende de la cantidad de agua que se añade a la masa podemos decir que la consistencia está ligada a la relación agua/cemento importante para el desarrollo de las propiedades resistentes del mortero.

- Tiempo de utilización o de trabajabilidad

Se define como el tiempo en minutos a partir del cual un mortero alcanza un límite definido de resistencia a ser penetrado con una sonda. Este procedimiento lo explica la Norma UNE-EN 1015-9: 2000 (UNE-EN 1015-9, 2000).

- Densidad

La densidad está ligada con los componentes de los morteros, igual que con el contenido de aire. Se determina mediante la Norma UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007 (Norma UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007).

- Adherencia

Se define como la capacidad del mortero para absorber tensiones tangenciales o normales a la superficie de la interfase mortero-base.

La adherencia del mortero fresco es debida a las propiedades reológicas de la pasta del conglomerante, donde la tensión superficial de la masa del mortero fresco es el factor clave para desarrollar este tipo de característica.

- Contenido de iones cloruro

La presencia de iones cloruro, solubles en el agua del mortero, pueden influir en el proceso de corrosión, así como en la aparición de eflorescencias. Por consiguiente, es necesario determinar su contenido para los morteros armados, conforme la Norma UNE-EN 1015-17:2001 (UNE-EN 1015-17, 2001) o experimentalmente. Para estos casos, la Norma UNE-EN 998-2:2012 (UNE-EN 998-2, 2012) establece que el contenido de estos cloruros no superará el 0,1% de la masa de la muestra en seco tomada según el procedimiento operatorio de la norma UNE-EN 1015-2:1999 (UNE-EN 1015-2, 1999).

- Capacidad de retención de agua

La retención de agua está relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante, y en general con la viscosidad de la pasta.

La retención de agua influye en el grado de hidratación del conglomerante, lo que determinará el ritmo de endurecimiento del mortero. Esta propiedad se mide con la capacidad humectante mediante la norma UNE-EN 1347:2008 (UNE-EN 1347, 2008).

Características del mortero endurecido

- Resistencia mecánica

El mortero debe tener una buena resistencia a la compresión ya que debe soportar hiladas de ladrillos o bloques.

Para determinar las resistencias a compresión y flexión se fabrican probetas prismáticas de 40x40x160 conservadas en el laboratorio durante 28 días según la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007 (UNE-EN 1015-11,2000/A1:2007).

- Adherencia

Se basa en la resistencia a tracción de la unión entre el mortero y el soporte.

Se determina por un ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero. Para el caso de los morteros de albañilería está definido por la norma UNE-EN 1015-12 y para los morteros cola por la norma UNE-EN 1348:1997 (UNE-EN 1348, 1997).

- Retracción

Se define como la contracción que experimenta el mortero por disminución de volumen durante el proceso de fraguado y principio de endurecimiento, esto se debe a la pérdida de agua tras la hidratación del mortero.

Se ha demostrado que las retracciones son más elevadas cuanto más rico en cemento y elementos finos sea el mortero. También se ha observado que la retracción aumenta cuanto mayor es la cantidad de agua de amasado.

- Absorción de agua

Si el mortero es permeable al agua, transmitirá ésta hacia el interior originando la consiguiente aparición de humedades por filtración. Además con este se favorece el tránsito de partículas o componentes no deseables para su durabilidad.

La absorción depende de la estructura capilar del material, por tanto cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará. La incorporación de aditivos también contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar en los morteros que los incorporan.

- Densidad

Dependerá de la densidad que tengan los componentes. También depende de la granulometría y volumen que estos ocupan. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento del mortero. A medida que aumenta dicha relación más poroso es el mortero.

- Permeabilidad al vapor de agua

El paso de vapor a través de la estructura capilar del material favorece su transpiración impidiendo la aparición de condensaciones en el interior, por causas higrotérmicas.

Existe un procedimiento operativo destinado a medir la permeabilidad de agua de los morteros para revocos exteriores según la UNE-EN 1015-19:1999 (UNE-EN 1015-19, 1999).

- Comportamiento térmico

Se define como la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo por una superficie unidad del material. Esta depende de la densidad, porosidad, contenido de humedad, etc. La Norma básica NBE-CT-79 fija los siguientes valores en función de la densidad (Tabla 2):

Tipo	Densidad (kg/m ³)	λ (kcal/hm ² °C)	λ (W/m ² °C)
Mortero de cemento	2000	1,2	1,4
Mortero mixto	1600	0,75	0,87

Tabla 2. Tipos de mortero según la densidad

- Comportamiento ante el fuego

Existen dos parámetros fundamentales que caracterizan el comportamiento ante un incendio: la reacción (M) y la resistencia ante el fuego (RF).

Según la Norma NBE-CPI-96 los morteros son clasificados en la clase menos peligrosa MO que indica que un material no es combustible ante la acción térmica.

La resistencia ante el fuego indica el tiempo durante el que un elemento debe mantener las condiciones que le sean exigibles en el ensayo normalizado conforme a la UNE-23093:1981 (UNE-23093, 1981).

Un mortero, sometido a altas temperaturas desarrolladas en un incendio, sufre una serie de cambios que afectan a su resistencia mecánica. En general, a temperaturas superiores a 250°C, las propiedades resistentes del mortero sufren una caída irreversible, quedando también afectado el color de este.

1.2. Materias primas empleadas en la fabricación de morteros

1.3. Cemento Portland

El cemento Portland es un alúminosilicato de calcio, patentado por J. Aspin en 1824, y denominado Portland por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra. Se obtiene por calentamiento incipiente (aproximadamente 1300°C) de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3 metros de diámetro y 100 metros de largo.

1.3.1. Clínter

El material obtenido se denominada 'clínter'. Éste está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminato de cal. Concretamente:

- Alita: silicato tricálcico 3CaOSiO_2 (C3S)
- Belita: silicato bicálcico 2CaOSiO_2 (C2S)

Aluminato tricálcico $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ (C3A)

- Celita: Ferrito aluminato tetracálcico $4\text{CaOAl}_2\text{F}_2\text{O}_3$ (C4AF)

Los silicatos suman del 60 al 80% de los componentes.

También constan de algunos componentes secundarios como: cal libre (CaO), óxido de magnesio, alcalinos (K_2O), (Na_2O), trióxido de azufre (SO_3).

Algunas propiedades de los constituyentes del clínter son las siguientes:

- Resistencia mecánica: se debe fundamentalmente a los silicatos
- Propiedades hidráulicas: gracias al C3S y C2S
- Fundentes: son productos que mezclados con el crudo, hacen que obtengamos el Clínker a menor temperatura (aluminatos y ferrito-aluminatos).
- Calor de hidratación: es el calor perdido debido a las reacciones de hidrólisis que se producen al fabricar la pasta de cemento C3A y C3S>C2S.
- Resistencia a los agentes externos: con el C3A más yeso se forma etringita (sulfoaluminato) que es muy expansivo por tener un volumen elevado (después del fraguado). El yeso se comporta por una parte con un efecto regulador del fraguado y por otra produce riesgo de agrietamiento.
- pH básico igual a 13 gracias a la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cal sobrante que se produce al hidratarse C3S y protege las armaduras.

1.3.2. Proceso de fabricación del cemento

El proceso de fabricación del cemento Portland consta de las siguientes etapas (Ilustración 1):

- I. De la cantera se obtienen las calizas y arcillas.
- II. Prehomogeneización: consiste en la formación de lechos de mezcla. El vertido es longitudinal y la captación transversal.
- III. Molienda con los molinos de bolas.
- IV. Homogeneización, se realiza en cajas de aireación (selección de partículas).
- V. Intercambiador de calor: son dispositivos previos al horno cuya finalidad es reducir la humedad de las materias primas, aumentar su temperatura e iniciar la calcinación.
- VI. Horno rotatorio: a 100°C se evapora el agua libre; a los 500°C evapora el agua combinada en la arcilla; a los 600°C se elimina el CO_2 del MgCO_3 ; a los 800°C se pierde el CO_2 del CaCO_3 . De 900 a 1200°C se produce la reacción entre la cal y la arcilla. De 1200°C a 1290°C se inicia la fase

líquida. La sinterización hace que el crudo se transforme en nódulos esféricos (clínker).

- VII. Enfriamiento suficientemente rápido para que impida que el óxido de magnesio procedente del carbonato, cristalice en forma de periclasa y de que parte de la cal libre se transforme en hidróxido cálcico (portlandita) para evitar problemas de expansión.
- VIII. Molienda: el clínker y el yeso (sulfato cálcico dihidratado) que actúa como regulador de fraguado, se muelen conjuntamente. La proporción de yeso depende del contenido de aluminato tricálcico que tenga el Clínker (suele estar comprendido entre el 3 y el 5% en peso).
- IX. Silos y ensacado

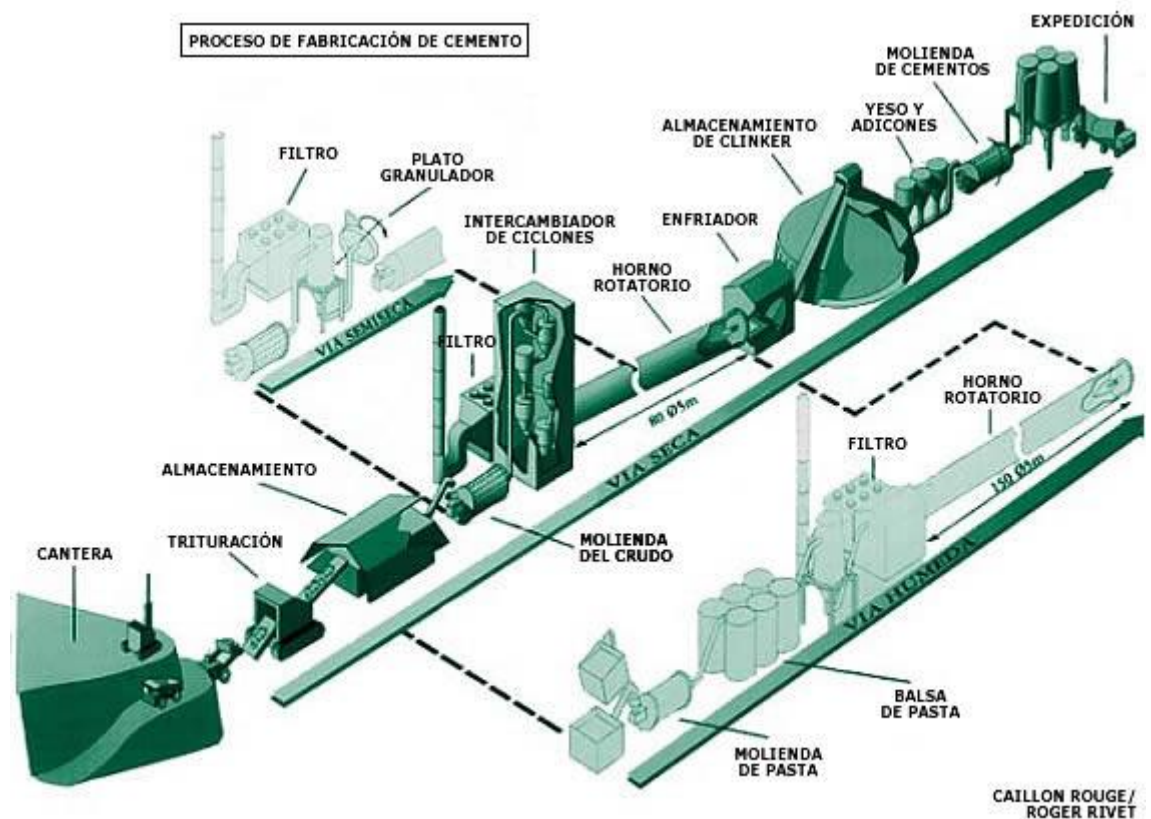


Ilustración 1. Proceso de fabricación del cemento Portland

1.3.3. Hidratación del cemento

En la mezcla de cemento y agua, los silicatos y aluminatos se hidratan dando lugar a una pasta rígida (fraguado).

Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de los componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados.

El primer componente que reacciona con el agua es el C3S, aunque su actividad queda frenada por la adición de yeso.

Las primeras reacciones de la hidratación se producen en la superficie de los granos dando lugar a precipitaciones de productos hidratados y nuevas disoluciones de componentes aumentando la viscosidad.

Se puede decir que el principio de la hidratación está generado por reacciones químicas pero que, posteriormente, al generarse la capa de gel, la difusión es el proceso que más participa en la hidratación.

A los primeros nódulos cristalizados de C3S le siguen los restantes componentes que al hidratarse rellenan los huecos dejados por los cristales anteriormente formados, apretándose las partículas entre sí por interposición de cristales y coagulación, produciéndose una fuerte adherencia entre los cristales y un endurecimiento de la pasta.

1.3.4. Tipos de cemento

La Instrucción para la Recepción de Cemento (RC-97) de España establece los siguientes tipos de cemento:

- Cementos comunes, CEM constituidos fundamentalmente en base a clínker de cemento Portland, junto con una pequeña cantidad de yeso (retardador de fraguado). Una vez alcanzada la finura adecuada, se almacena en silos antes de su comercialización.
- Cementos blancos, BL, son cementos comunes con determinada composición e índice de blancura.

- Cementos para usos especiales, ESP. En estos cementos, el clínker de cemento Portland ocupa un lugar secundario frente a las adiciones de escorias, puzolanas o cenizas volantes.
- Cemento de aluminato de calcio CAC/R. Se trata de cementos con alto contenido de aluminatos de calcio (cementos aluminosos).
- Cementos con características adicionales. Estos cementos son de los tipos anteriores que, además presentan características adicionales como la resistencia a los sulfatos y/o al agua de mar (SR y/o MR) o desarrollan un bajo calor de hidratación (BC).

Otra clasificación que cabe destacar es la que nos da la norma UNE-EN 197-1:2000 (UNE-EN 197-1, 2000) (Tabla 3).

Tipos de cemento	Denominaciones	Designaciones
I	Cemento Portland	CEM I
II	Cemento Portland con adiciones	CEM II
III	Cemento Portland con escorias de horno alto	CEM III
IV	Cemento puzolánico	CEM IV
V	Cemento compuesto	CEM V

Tabla 3. Tipos de cemento

1.4. Áridos

Los áridos que forman parte de los morteros son materiales granulares inorgánicos de tamaño variable. Su naturaleza se define como inerte ya que solos no deben actuar químicamente frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos (aire, agua, hielo, etc.) Sin embargo, sí influye de forma determinante en las propiedades físicas del mortero, al unirse a un conglomerante. En general, no son aceptables áridos que contengan sulfuros oxidables, silicatos inestables o componentes de hierro igualmente inestables.

1.4.1. Tipos de áridos

Según su procedencia y método de obtención, los áridos pueden clasificarse en:

Áridos naturales. Son los procedentes de yacimientos minerales obtenidos sólo por procedimientos mecánicos. Están constituidos por dos grandes grupos

Áridos granulares. Se obtienen básicamente de graveras que explotan depósitos granulares. Estos áridos se usan después de haber sufrido un lavado y clasificación. Tienen forma redondeada, con superficies lisas y sin aristas, y se les denomina ‘áridos rodados’. Son principalmente áridos de naturaleza silícea.

Áridos de machaqueo. Se producen en canteras tras arrancar los materiales de los macizos rocosos y someterlos posteriormente a trituración, molienda y clasificación. Presentan superficies rugosas y aristas vivas. Son principalmente áridos de naturaleza caliza, aunque también pueden ser de naturaleza silícea.

Áridos artificiales. Están constituidos por subproductos o residuos de procesos industriales, resultantes de un proceso que comprende una modificación térmica u otras. Son las escorias siderúrgicas, cenizas volantes de la combustión del carbón, filleres, etc.

Áridos reciclados. Resultan de un tratamiento del material inorgánico que se ha utilizado previamente en la construcción, por ejemplo, los procedentes del derribo de edificaciones, estructuras de firmes, etc.

Aunque las arenas no toman parte activa en el fraguado y endurecimiento del mortero, desempeñan un papel técnico muy importante en las características de ese material, porque conforman la mayor parte del volumen total del mortero. Por ello, podríamos decir que la arena es la esencia del mortero. De ahí la importancia de conocer algunas de sus características tanto físicas como químicas.

1.4.2. Propiedades físicas de los áridos

Tamaño del árido: Los áridos se dividen en arenas (árido fino) y gravas (árido grueso). La diferencia entre unos y otros está únicamente en su tamaño. Se denomina arena al material granular que pasa por un tamiz de 4 mm de luz de malla. Grava es el material granular que queda retenido en dicho tamiz.

Tamaño (d/D): Las arenas reciben una denominación nominal (d/D) en términos del menor (d) y del mayor (D) tamaño de los tamices, dentro de los cuales se encuentra la mayor parte del árido (por ejemplo: 0/2,0/4, etc.)

Dentro de las arenas se pueden distinguir las arenas gruesas (2/4) y arenas finas (0,063/2). Se denomina fino o filler de árido, al que su porcentaje en masa que pasa por el tamiz 0,062 es mayor del 70%, según la norma UNE-EN 13139:2003/AC:2004 (UNE-EN 13139, 2003/AC:2004) (Tabla 4).

Tamaño de los áridos mm	Límites superiores			Límites inferiores	
	2D	1,4D	D	D	0,5d
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 4. Límites superior e inferior del tamaño de árido según EN: 13139:2002

Granulometría de la arena: La composición de los distintos tamaños de las partículas que integran un árido se denomina granulometría. Esta relación viene dada por la norma UNE-EN 933-2/1M:1999 (UNE-EN 933-2/1M, 1999) que recoge una serie de tamices constituido por los siguientes pasos de malla:

0,063 – 0,125 – 0,250 – 0,500 -1- 2- 4 mm

Los áridos estipulados para morteros según la designación d/D explicada son:

0/1 – 0/2 – 0/4 -2/4- 2/8

Esta designación admite alguna cantidad de partículas retenidas en el tamaño mayor (límite superior) o que atraviesan el tamiz menor (límite inferior). Los áridos marcan un límite inferior y un límite superior referido al porcentaje en peso que pasa por los tamices según la norma UNE-EN 13139:2003/AC: 2004 (UNE-EN 13139, 2003/AC: 2004).

El fin último de la granulometría es conocer la curva granulométrica de la arena así como su módulo granulométrico.

Curva granulométrica. Una vez realizado el tamizado de la muestra, los resultados obtenidos se representan en un gráfico donde en el eje vertical se colocan los porcentajes que pasan acumulados por cada tamiz y en el eje horizontal la abertura de los mismos. Con la representación gráfica de la arena (Ilustración 2) se puede identificar rápidamente si ésta tiene exceso de fracciones gruesas o finas o la presencia de discontinuidades en la distribución por tamaños

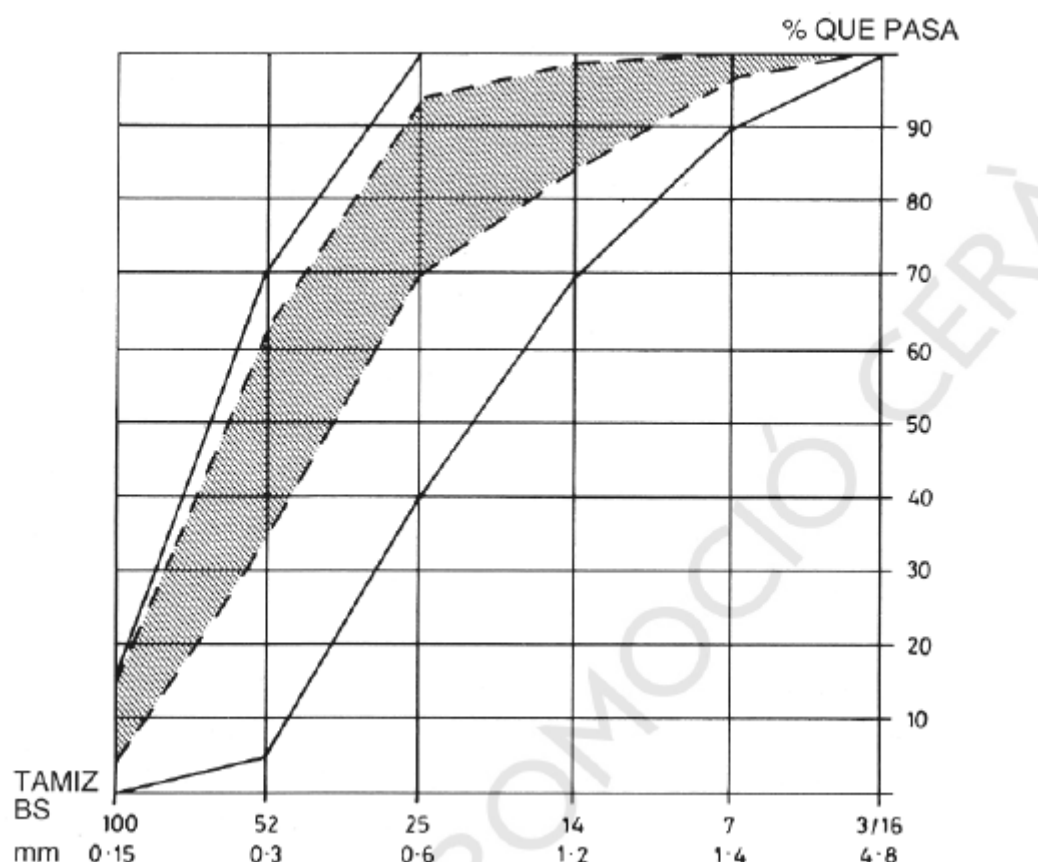


Ilustración 2. Límites granulométricos de las arenas para morteros de uso general según la norma BS 1200:1976

Módulo granulométrico. Consiste en la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie UNE dividida por 100. El módulo granulométrico recibe el nombre también de módulo de finura

Este módulo nos da idea del tamaño medio del árido empleado en un mortero. Pueden existir infinidad de áridos con el mismo módulo granulométrico, que tengan granulometrías totalmente diferentes. No obstante, resulta adecuado conocer su valor debido a que todas las mezclas de áridos que poseen el mismo módulo precisan la misma cantidad de agua para producir morteros de la misma trabajabilidad y resistencia. Esto es así siempre que empleen idéntica cantidad de cemento y de los restantes componentes del mortero, ya que, variaciones en el módulo de los áridos indican que ha habido alteraciones en los de una misma procedencia.

Finos. Se entiende por finos la fracción granulométrica de una arena que pasa por el tamiz 0,063 mm. La cantidad máxima de finos también está regulada por la norma UNE-EN 933-1:2012 (UNE-EN 933-1, 2012). Pese a que los finos incorporan plasticidad al mortero, es conveniente controlar su contenido en el mismo, ya que un exceso de éstos puede provocar un aumento de la relación agua/cemento, con la consiguiente disminución de la resistencia mecánica de dicho mortero. Por otra parte, el exceso de finos puede favorecer a la aparición de fisuras por retracciones en el mortero.

Humedad. Debe controlarse el grado de humedad de los áridos que van a emplearse en la fabricación del mortero, dado que el contenido de humedad existente en estos componentes puede alterar la relación agua/cemento prevista.

La granulometría idónea de un mortero depende de las exigencias que vayamos a requerir y de su aplicación específica. Obtenerla requiere, como hemos visto, precisión y control al suministrar lo que no siempre es fácil de aplicar en obra.

1.5. Agua

El agua utilizada, tanto en el amasado como durante el curado en obra, debe ser de naturaleza inocua. No contendrá ningún agente en cantidades que alteren las propiedades del mortero, tales como sulfatos, cloruros, etc. De lo contrario pueden

derivarse, por ejemplo, eflorescencias si el contenido en sales solubles es elevado. O bien, en el caso de morteros armados, se cuidará especialmente que no porte sustancias que produzca la corrosión de los aceros.

En general, se pueden emplear todas aquellas aguas cuya experiencia práctica se haya contrastado favorablemente. En otros casos es necesario proceder a su análisis.

1.6. Aditivos

Son sustancias o materiales añadidos, antes o durante la mezcla del mortero, en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento (su proporción no supera el 5% en masa del contenido de cemento). Su función es aportar a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, determinadas modificaciones bien definidas y con carácter permanente.

Los aditivos aptos para morteros deben cumplir las exigencias prescritas en la norma UNE-EN 934-4:2010 (UNE-EN 934-4, 2010).

Los aditivos más comunes se clasifican según las propiedades que confieren al mortero, conforme a su función principal.

1.6.1. Tipos de aditivos

- Aireante: modificadores del contenido en aire

Este efecto consiste en la introducción dentro de la masa de mortero de pequeñas burbujas de aire de diámetro comprendido entre 10 y 500 micras durante el amasado. Estas burbujas son muy beneficiosas ya que:

- Debido a su forma esférica y flexible actúan como lubricante del mortero en estado fresco, mejorando la docilidad.
- Interrumpen la red capilar de la masa del mortero, impidiendo la penetración de agua y productos de la hidratación del cemento, protegiendo la masa del efecto de las heladas.

- Al incluir aire, disminuyen la densidad aparente del mortero fresco, lo cual, unido a lo anterior, tiende a evitar la segregación y exudación del mortero en estado fresco.

El contenido de este aditivo debe ser perfectamente controlado puesto que su exceso deriva en una sensible pérdida de las resistencias finales del mortero

- Plastificante: modificadores de la reología en estado fresco

Este efecto provoca que aumente la docilidad del mortero en estado fresco. Se consigue mediante la dispersión temporal de las partículas de cemento, que origina:

- Reducción de la relación agua/cemento en beneficio de la resistencia mecánica y la durabilidad.
- Aumento de la plasticidad del mortero permaneciendo la mezcla trabajable durante un mayor período de tiempo.

Por el contrario, un inadecuado contenido de los plastificantes puede acarrear un excesivo tiempo de fraguado.

- Retardantes: Modificadores del tiempo de fraguado y/o endurecimiento

Son aditivos que retrasan el tiempo de fraguado del cemento, de modo que aumenta el período necesario para que los morteros pasen del estado plástico al estado sólido, sin influir notablemente en la evolución de las resistencias mecánicas en las edades finales. Así prolongan el tiempo de trabajabilidad del mortero.

Como en los casos anteriores, debe medirse cuidadosamente las proporciones de los retardantes empleados para no ocasionar efectos contraproducentes en el resultado final de la mezcla.

- Hidrofugantes

Están compuestos principalmente por ácidos grasos saturados o insaturados. El principal efecto de estos aditivos es minimizar la absorción de agua por capilares del mortero endurecido. Esto no supone que el mortero sea impermeable (para ello hay

que recurrir a imprimaciones especiales), sino que su capacidad de absorción frente al agua a baja presión (agua de lluvia) es sustancialmente menor que un mortero fabricado sin ese aditivo.

- Retenedores de agua

Estos aditivos aumentan enormemente la capacidad de retención de agua e impiden, así que el mortero pierda agua con demasiada rapidez. Se fundamentan en el incremento de la viscosidad de la pasta y generan los siguientes efectos:

- Reducen la absorción de agua y su tendencia a la evaporación
- Mantienen suficiente agua para que el cemento se hidrate convenientemente y desarrolle, de modo conveniente, todas sus propiedades.
- Modulan la viscosidad de la masa de mortero.
- Atenúan la tendencia a la exudación en los casos de granulometrías incorrectas o carencia de finos.

- Resinas

Las resinas se definen como ligantes orgánicos poliméricos que aporta, principalmente al mortero, adherencia química. Se emplean fundamentalmente para la fabricación de morteros cola, impermeables, de reparación, etc. Las resinas mejoran las propiedades durante la aplicación del mortero, en el fraguado y a lo largo de su vida útil. Entre otros efectos, son destacables:

- Aumento de la capacidad adherente.
- Aumento de la elasticidad
- Mejora de la impermeabilidad

- Adiciones

Las adiciones son materiales inorgánicos que finamente divididos se pueden utilizar en la fabricación de morteros con el fin de mejorar ciertas propiedades o

conseguir propiedades especiales. Son preferentemente materiales inorgánicos tales como pigmentos, filleres, minerales, puzolánicos, cenizas volantes, escorias, etc.

1.7. Serrín

El serrín utilizado como sustituto del árido en la fabricación de morteros proviene de los tableros fabricados por la empresa Tafisa en Linares (Jaén).

Estos tableros están fabricados con chopo o álamo. Se denomina chopo o álamo al conjunto de especies vegetales dentro del género *Populus*, que cuenta con 35 especies.

La fabricación de envases de madera está basada en el desarrollo del chopo, ya sea para realizar tablillas o para fabricar un tablero de contrachapado.

En el chopo la parte más valiosa se dedica al desenrollo, pudiendo utilizarse también para el aserrado y la fabricación de celulosa o de tablero aglomerado de partículas.

La importancia del chopo está aumentando en el mundo. La producción europea es de 5 millones de metros cúbicos al año, y la española ha superado los 600.000 metros cúbicos en algunos años de la última quincena.

En España, se destaca la producción de madera de chopo en la región de Castilla-León principalmente la Cuenca del Duero, con algo más de 50% de la superficie, tras esta zona se destacan en orden de importancia las comunidades de :Andalucía, Castilla-La Mancha y Cataluña, Navarra, La Rioja y Aragón, básicamente la Cuenca del Ebro.

El chopo es una de las especies más significativas en la repoblación forestal de las cuencas hidrográficas, pues ayuda a regular y a estabilizar los cauces y mejora la calidad del paisaje recuperando grandes espacios forestales. Además es un sostén económico y de la calidad de vida de las zonas rurales donde se asienta como monte ordenado.

La vida media de un chopo está entre 10 y 15 años. Para desenrollar el chopo es necesario un tronco de entre 25 y 50 cm de diámetro, obteniéndose el mayor rendimiento (entre un 60-70%) frente al resto de aprovechamientos.

Aunque la industria de productos procedentes de la madera es un sector muy tradicional, actualmente existe la necesidad de nuevas técnicas y de mejora de sus procesos de fabricación. Entre los factores que condicionan esa exigencia es posible citar:

- La escasez de materias primas, puesto que, desgraciadamente, cada día quedan menos árboles y la repoblación forestal no se hace o se hace con especies inadecuadas
- El precio: como consecuencia de lo anterior, los precios de las materias primas han alcanzado cifras considerables y algunas especies tienen ya un precio prohibitivo.
- La calidad: la utilización de tableros de partículas y fibras, de fiabilidad total en longevidad y estabilidad a los paneles, puertas, etc. No son atacados por insectos, polilla, carcoma, termitas, etc., ni se agrietan ni se mueven dentro de su almacén o por si solos.
- El diseño puede modificarse, así como la forma y el tamaño, con un coste muy inferior al que se tendría mediante el empleo de los métodos tradicionales.
- La elección, examen, preparación, saneado, secado, etc de la madera para la fabricación de una serie de muebles que deban tener los mismos tonos y sin defectos requiere una gran cantidad de tiempo, incrementando costes.
- Los residuos: no se suele prestar mucha atención al tema de los residuos lo cual supone un gran error debido a la importancia en términos económicos que éstos pueden llegar a tener. Si se calculase el coste de los trozos que se tira, o que en el mejor de los casos, se emplean para alimentar las calderas, se obtendría una cantidad de dinero lo suficientemente importante como para plantearse una alternativa menos

derrochadora de dinero. Esto, considerando únicamente los residuos que se producen por los defectos que inevitablemente presenta la madera.

Desde los aglomerados más groseros y de peor calidad, pasando por los homogéneos hasta los MDF (Medium Density Fiber) en sus diferentes escalas de densidad y finura, la idea básica es la de sustituir a la madera teniendo como referencia los múltiples problemas de ésta, tratando de aportar soluciones a los mismos. Así pues tenemos, por un lado, las florecientes industrias que se dedican a la fabricación de aglomerados, cada vez más complejas, mejor dotadas y que ofrecen sus productos listos para ser utilizados en múltiples aplicaciones, y por otro lado, las que se dedican a la fabricación de MDF. Algunos aspectos a resaltar del producto obtenido mediante estas técnicas son:

No hay escasez de materias primas: la fabricación de aglomerado o MDF incide en menor medida en la deforestación que sufren nuestros bosques.

El precio del aglomerado es mucho más bajo, debido quizás a la fuerte competencia existente entre las empresas fabricantes. También se puede citar la facilidad de encontrar proveedores.

La preparación de un tablero es fácil, regular y no requiere de personal especializado pudiendo automatizarse los procesos con fiabilidad. No tienen defectos que obliguen a sustituir partes, como ocurre en el caso de la madera. Los desperdicios de los tableros se reducen a la mínima expresión, ya que incluso los retales son aprovechables para piezas más pequeñas.

Los tableros MDF están constituidos por una mezcla de pequeñas fibras de madera (generalmente procedentes del pino) y por colas especiales, prensadas en condiciones de presión y temperatura controladas. Se obtiene de éste modo planchas, de medidas fijas estandarizadas, con unas características de los mejores aglomerados de madera, añadiendo además una nueva y básica característica: la posibilidad de una gran regularidad en el espesor del tablero. Esta característica adicional, combinada con la naturaleza fibrosa de sus componentes, le confiere propiedades que permiten que se trabaje con la docilidad de las buenas maderas de ebanistería. Estas placas MDF, a diferencia del aglomerado, pueden ser mecanizadas obteniéndose

excelentes terminaciones. Generalmente son de color claro y de superficie lisa y uniforme y se emplean para diferentes propósitos: construcción, carpintería especializada, mobiliario, etc. Su empleo se muestra con mayor detalle en la página de la Asociación Nacional de Fabricantes de Tableros (ANFTA). Por todo ello, los campos de utilización del MDF quedan reservados a las condiciones más exigentes de utilización de los tableros aglomerados y a aquellas de utilización de la madera donde lo que más cuenta de ésta sea la uniformidad de la estructura.

En 2001, la producción europea de tableros MDF representaba el 48% de la producción mundial, con un consumo del 41%. A nivel europeo, España se encuentra en el cuarto puesto, tanto en producción total de tableros como en tableros MDF.

En España el sector está repartido a unas pocas empresas (FINSA, TAFISA S.A, TEFASA, TABLICIA S.A, UTISA, Grupo Losan, etc) con numerosas fábricas repartidas por la geografía nacional (Ilustración 3).



Ilustración 3. Mapa industrias de la madera en España

1.7.1. Proceso fabricación tableros MDF

El proceso de fabricación de un tablero MDF consta de diferentes etapas, cuyo esquema general puede observarse en la figura 2. En primer lugar se trata la madera, materia prima fundamental del proceso sometiéndola a un descortezado, astillado y cribado. La astilla de madera resultante se almacena hasta su utilización posterior, en

la que se produce un lavado y un desfibrado. Una vez conseguida una fibra de madera con las condiciones adecuadas de humedad y temperatura, se le añaden una serie de aditivos como la cola, el endurecedor y la parafina, que tienen distintas funciones. Después de una fase de secado para reducir el nivel de humedad al necesario, se introduce la fibra en la formadora, donde se genera una manta. La prensa mediante la aplicación de presión y temperatura a dicha manta, produce tablero del ancho y espesor necesarios. A la salida se corta a las dimensiones adecuadas y los tableros resultantes se enfrían y pasan a un almacén intermedio hasta su lijado y empaquetado final (Ilustración 4).

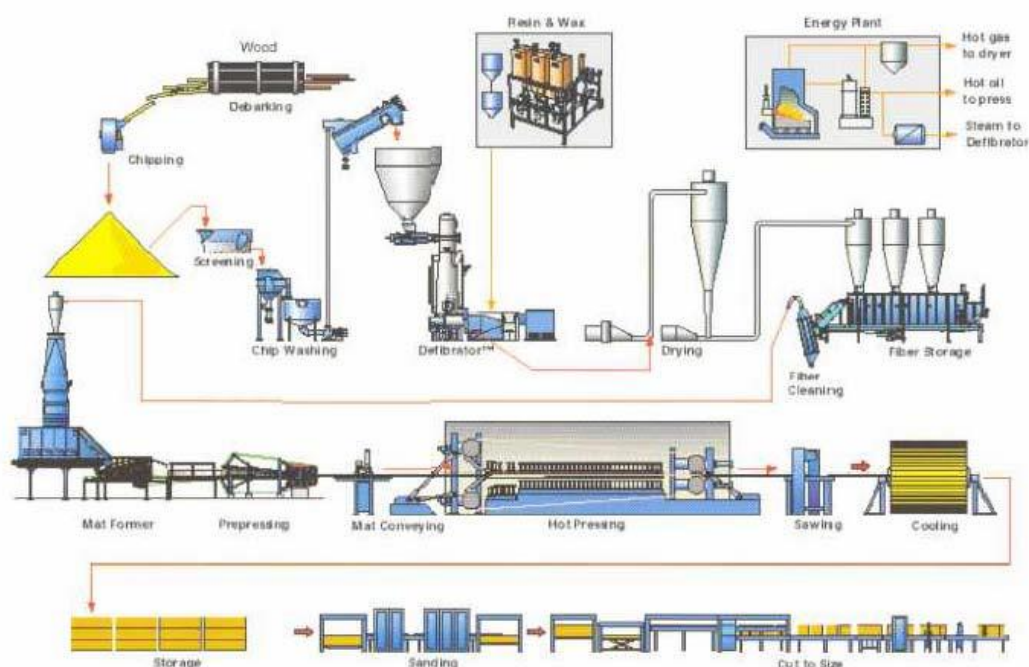


Ilustración 4. Proceso fabricación tableros MDF

1.7.2. Uso de residuos de madera en la fabricación de morteros

La industria de la construcción es un sector con una gran demanda de recursos y materiales, por lo que tiene un enorme potencial de aprovechamiento de residuos.

El empleo de agregados ligeros en la fabricación de hormigón o mortero presenta ventajas significativas debido al valor medioambiental que supone la valorización del

residuo y la mejora de las propiedades del mortero u hormigón como aislamiento térmico.

El empleo de subproductos de madera como reemplazo de cemento en morteros no ha mostrado la mejora de las propiedades mecánicas debido a la incompatibilidad química entre la biomasa y el cemento. Las características de los morteros dependen de la naturaleza de la biomasa usada, ya que presentan diferencias de sus propiedades como la constitución anatómica, características físicas y la constitución química (Turgut y Algin, 2007).

Los principales inconvenientes que presenta el utilizar residuos de la madera como material de construcción son su porosidad, su higroscopía, y sus componentes orgánicos. El fraguado de mezclas de compuestos vegetales y cemento se retrasa con respecto a las mezclas que sólo contienen cemento, y esto ocurre probablemente debido a la presencia de algunos azúcares solubles en agua (Gatani, 2010). La presencia de hemicelulosas tiene un efecto de retardo en el inicio del fraguado y pérdida de resistencia, debido a su solubilidad parcial en agua. Además, se reconoce el efecto retardador en el fraguado del cemento Portland por la presencia de lignina. Por ese motivo se han desarrollado métodos para reducir el movimiento de agua en sus poros, resolver cuestiones propias de la dosificación (relación agua/cemento, características del curado y mezclado), conseguir la mineralización del serrín para asegurar su durabilidad (González De La Coterá, 1982). Con objeto de reducir la materia orgánica presente en el residuo de madera, en especial los azúcares solubles en agua (retardadores del fraguado) se llevan a cabo distintos pretratamientos al residuo. Los pretratamientos más comunes consisten en un lavado y agitado con agua destilada, aplicándose también pretratamientos con ácido nítrico y con hidróxido sódico y posterior lavado con agua destilada, a fin de que se pueda hidrolizar la parte orgánica del serrín al contactar con el ácido o con la base; de ese modo, se elimina con el lavado, permitiendo que la interacción posterior entre el serrín y el medio alcalino del cemento no aumente la concentración de azúcares en el medio acuoso e impida el fraguado del cemento.

El objetivo de este TFG es la elaboración de morteros ligeros que incorporan serrín, que presenten unos tiempos de fraguado y resistencias mecánicas aceptables.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del TFG es la elaboración de morteros de cemento Portland ligeros al sustituir parte del agregado (0-20% en volumen) por residuos de la madera (procedente de la fabricación de tableros). Se estudiará la influencia del residuo de madera sin y con pretratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en las propiedades físicas y mecánicas para un tiempo de curado de 7 y 28 días.

Los objetivos que vamos a llevar a cabo son los siguientes:

- Fabricación de las probetas para los distintos porcentajes de serrín sin pretratamiento y sometido a pretratamiento.
- Caracterización de los morteros e influencia del pretratamiento de mineralización del serrón estudiando sus propiedades mediante ensayos físicos como absorción de agua por capilaridad y densidad aparente; y mecánicos como resistencia a compresión o flexión para los tiempos de curado de 7 y 28 días.
- Estudio de la adición óptima de residuos de la industria de la madera para la fabricación de morteros con buenas propiedades físicas y mecánicas.
- Evaluación económica de los distintos materiales empleados en la fabricación de morteros

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

Para la fabricación de las probetas de mortero de cemento con la presencia de residuos de la madera se han utilizado las siguientes materias primas (Ilustración 5):

- 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
- Serrín procedente de la trituración de tableros de madera fabricados por la empresa Tafisa S.A en Linares (Jaén).



Ilustración 5. Materiales empleados en la fabricación de probetas

El empleo de serrín como sustitutivo parcial del árido arena en la fabricación de morteros presenta varias ventajas económicas y medioambientales al ser un residuo que está disponible a un precio competitivo, coste cero y su empleo como materia prima puede contribuir a la sostenibilidad medioambiental.

El serrín lo utilizamos tanto tratado como sin tratar. Para tratar el serrín preparamos una disolución del 10% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es decir introducimos en un recipiente 10 gramos de hidróxido de calcio en un litro de agua. En esta disolución sumergimos el serrín sin tratar y dejamos 24 horas para asegurar la saturación del serrín. Por último extendemos la muestra y dejamos hasta que esté completamente seca (Ilustración 6).



Ilustración 6. Secado del serrín después del tratamiento

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:

$$\% \text{ humedad} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \text{ (Ec. 1)}$$

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 cm³ (N₁), y la segunda realizando un tanteo de la cantidad de material necesaria para obtener un volumen próximo a los 20 cm³ (N₂).

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{masa del material (g)}}{\text{volumen desplazado (cm}^3\text{)}} \text{ Ec. (2)}$$

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 atraviesa 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 la 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 del 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 Ka ($\lambda=1,5406$) 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 (Ilustración 7). 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 1 kV 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 siguiente figura se muestra el SEM utilizado.



Ilustración 7. Equipo de microscopía electrónica de barrido

3.3. Elaboración de probetas de mortero

Prepararemos una serie de moldes de mortero a los cuales le realizaremos ciertos ensayos normalizados, para un tiempo de curado de 7 y 28 días.

Utilizaremos como referencia la norma UNE-EN 196-1: 2005 (UNE-EN 196-1, 2005) para llevar a cabo la preparación, amasado y posterior curado de las probetas de mortero de cemento.

3.3.1. Requisitos para la fabricación de morteros

Las dimensiones y la forma de las probetas están normalizadas según la norma UNE-EN 196-1:2005 (UNE-EN 196-1, 2005) y tienen que ser prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm.

Para la preparación del cemento se debe tener en cuenta que está compuesto por tres partes en masa de arena normalizada CEN, una parte en masa de cemento Portland y una relación de agua/cemento de 0,50.

El molde está compuesto por tres compartimentos horizontales, para la fabricación de tres probetas simultáneas. Este molde está fabricado con acero con un espesor de aproximadamente 10 mm.

Las condiciones atmosféricas del laboratorio para la fabricación de las probetas son de 20°C con una tolerancia de 2°C y una humedad relativa superior al 50%.

3.3.2. Proceso de fabricación de las probetas de mortero

El molde está formado por una base con dos paredes frontales y una trasera además de cuatro paredes desmontables que nos sirven de separación para cada una de las tres probetas y para hacer más fácil el desmolde. Las paredes fijas presentan unas ranuras para lograr mayor facilidad a la hora de encajar las piezas desmontables. Para el cierre el molde dispone de un tornillo sinfín que nos permite cerrar herméticamente el molde. En la figura 8 podemos ver una imagen del molde empleado.

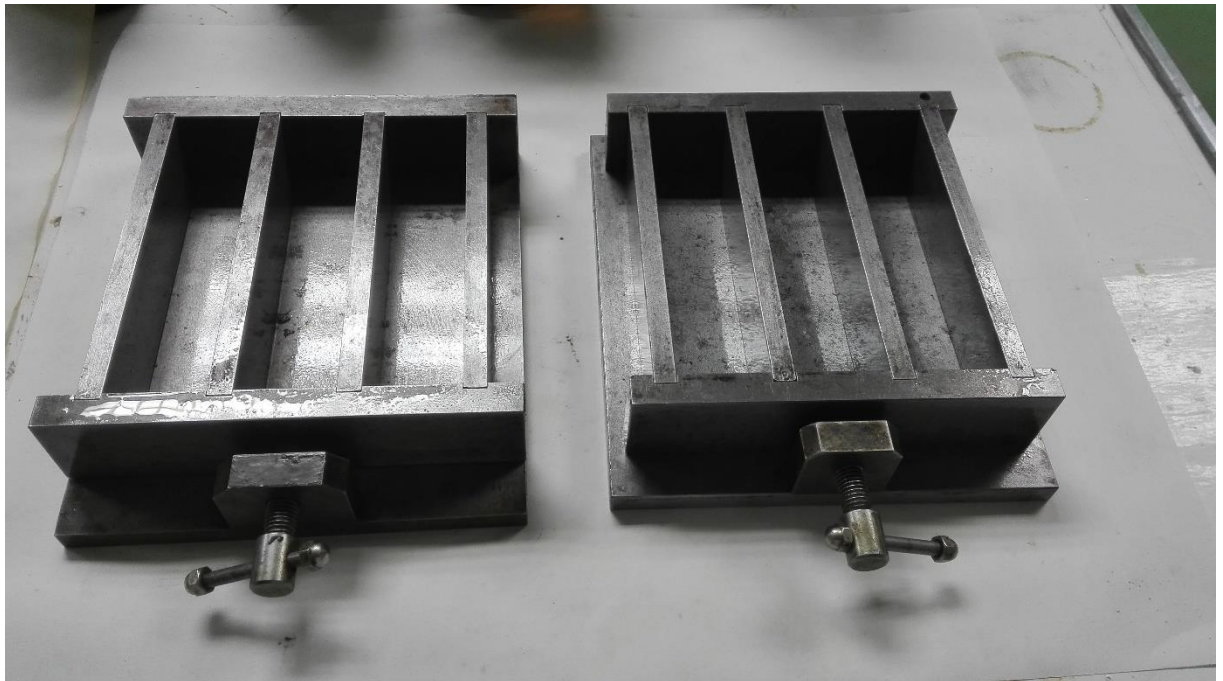


Ilustración 8. Moldes

Para sacar las probetas del molde aflojamos el tornillo sinfín y con ayuda de un mazo de goma vamos retirando las partes móviles con cuidado de no romper las probetas. Por último limpiamos los moldes y los engrasamos con aceite.

Procedimiento de fabricación de probetas:

- 1) Realizamos los cálculos de todas las cantidades de serrín, agua, cemento y arena empleadas para la fabricación de las probetas sustituyendo los

porcentajes de 5, 10, 15 y 20 % en volumen de arena por serrín tanto sin tratar como pretratado. En primer lugar calculamos la densidad del serrín. Medimos un volumen de 500 ml y lo pesamos obteniendo una masa de 149,055 con lo que sabemos que su densidad es $149,055/500=0,29811$ g/ml. A continuación sacamos la densidad de la arena sabiendo que la arena normalizada pesa 1350 g sacamos su volumen, 800 ml obteniendo una densidad de $1350/800=1,6875$ g/ml. Conocidas estas dos densidades podemos hacer los cálculos para todos los porcentajes de serrín a incorporar como sustitutivo del árido como se puede ver en la tabla 5.

% Serrín	Serrín(g)	Arena(g)	Cemento(g)	Agua(g)
0%	0	1350	450	225
5% tratado	11,9233	1282,5	450	225
10% tratado	23,85	1215	450	225
15% tratado	35,7732	1147,5	450	225
20% tratado	47,6976	1080	450	225
5% sin tratar	11,9233	1282,5	450	225
10% sin tratar	23,85	1215	450	225
15% sin tratar	35,7732	1147,5	450	225
20% sin tratar	47,6976	1080	450	225

Tabla 5. Peso para cada uno de los componentes del mortero en función del porcentaje de serrín

- 2) Se realiza el peso de cada material teniendo en cuenta las composiciones mostradas en la Tabla 5.
- 3) Amasado del mortero por medio del siguiente procedimiento normalizado. Se vierte el agua a la mezcla de cemento dentro del recipiente. Se enciende la amasadora a velocidad lenta durante 30 segundos. Inmediatamente, durante 30 segundos adicionales se introduce la arena y los residuos de madera. Se continúa amasando durante 30 segundos más a velocidad rápida. Se para la amasadora durante 90 segundos. En los primeros 30 segundos se retira con una espátula metálica el material adherido al recipiente y se coloca en el centro de la amasadora. Se continúa el amasado durante 60 segundos a velocidad rápida. La máquina utilizada en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química Ambiental y de los

Materiales para el amasado es la amasadora planetaria Proeti Mortar Mixer C0085CE (Ilustración 9).



Ilustración 9. Máquina amasadora

- 4) Enmoldado de las probetas inmediatamente después de la preparación del mortero. Se llenan los moldes hasta la mitad y se sacude con 60 golpes de forma manual. Se introduce la segunda capa de mortero con un excedente y se somete a compactación manual con 60 golpes más. Se quita el exceso con la regla plana para lograr una superficie uniforme y lisa. El resultado final se puede ver en la figura 10.



Ilustración 10. Resultado final de las probetas en el molde

- 5) Se etiquetan los moldes para su respectiva identificación.
- 6) Se lleva a cabo el desmoldado de forma sencilla tras 24 horas de fraguado abriendo la cara lateral de la probeta y se marcan las probetas con tinta resistente al agua
- 7) El curado se realizará al aire en una cámara con humedad mayor del 80% durante 7 y 28 días.
- 8) Pasado este tiempo se meten en acetona 24 h para detenerla reacción de hidratación. Después se sacan de la acetona y se dejan al aire en el laboratorio.

3.4. Ensayos físicos

3.4.1. Determinación de la densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente en seco de los morteros utilizamos la norma UNE-EN 1015-10:2010 (UNE-EN 1015-10, 2010).

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

El procedimiento operatorio consta de dos partes. Por un lado el secado a masa constante y por otro la determinación del volumen de la probeta por desplazamiento volumétrico.

Secado a masa constante: La probeta se seca en la estufa a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta que se alcance masa constante. Se considera que la probeta ha alcanzado masa constante cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas a intervalos de 2 horas de secado, no difieren en más de 0,2% de la masa de la probeta seca. Se anota la masa de la probeta, $m_{s,\text{sec}}$ en kg con una exactitud aproximada del 0,1%.

Determinación del volumen de la probeta por desplazamiento volumétrico: La probeta se sumerge en agua a $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta que no se observe aumento de la masa aparente. Se considera que esta fase se alcanza cuando dos pesadas sucesivas, efectuadas en un intervalo de 15 minutos durante la inmersión, no difieren en más de 0,2% en masa. La probeta húmeda se pesa después de haber eliminado el exceso de agua con un paño húmedo y se anota su masa $m_{s,\text{sat}}$, en kg con una exactitud aproximada del 0,1%.

El volumen de la probeta se puede determinar por pesada hidrostática.

Se deja que el instrumento de pesado alcance el equilibrio, asegurándose que el estribo vacío está suspendido y que está completamente sumergido en el agua del recipiente. El estribo se sumerge hasta la misma profundidad en las que se efectúen las pesadas con o sin la probeta. La probeta en esta posición (sumergida) cuando ha cesado la oscilación de la balanza hidrostática se pesa y se anota la masa de la probeta, $m_{s,i}$, en kg en esta posición sumergida.



Ilustración 11. Balanza hidrostática

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

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w} \quad \text{Ec. (5)}$$

La densidad aparente en seco de cada probeta de mortero se calcula dividiendo la masa de la probeta secada en estufa, $m_{s,sec}$, en kilogramos, por el volumen de la probeta del mortero endurecido, V_s , en metros cúbicos.

El valor medio se calcula a partir de los valores individuales obtenidos para cada probeta

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

La determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido viene dado por la norma UNE-EN 1015-18: 2003 (UNE-EN 1015-18, 2003).

Para realizar este ensayo necesitamos que las probetas estén partidas en dos mitades por lo que anteriormente realizamos el ensayo de resistencia a flexión.

En primer lugar aplicamos un material de sellado a las cuatro caras laterales del semiprisma, aproximadamente unos 20 mm sobre la parte de la probeta que está rota. El material de sellado puede ser cera de parafina o resina sintética que tiene como principal característica un punto de fusión superior a 60°C. Esto es fundamental ya que después de aplicar esta cera las probetas pasaran a la estufa a una temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta conseguir que se selle. Dejamos las probetas en la estufa aproximadamente 24 horas y tras sacarlas procedemos a pesarlas (este peso se denomina M0)

Las probetas se colocan en una bandeja, con las caras rotas (superficie de rotura) de los prismas vueltas hacia abajo, sobre los cuatro soportes de manera que no toquen el fondo de la bandeja y se sumergen en el agua hasta una altura de 5 mm a 10 mm durante la duración del ensayo. Las probetas se colocan inclinándolas con el fin de asegurar la inmersión completa de las probetas con superficies rugosas y evitar la formación de burbujas de aire.



Ilustración 12. Ensayo capilaridad

Se pone en marcha el cronómetro. Se mantiene el nivel del agua constante durante el ensayo

Se cubre la bandeja para evitar la evaporación en la superficie de las probetas sumergidas.

Si una traza visible de humedad aparece sobre la superficie libre de las probetas, se suspende el ensayo. Se rompen las probetas para confirmar que están completamente saturadas. Si están saturadas, se pesan los dos trozos ensamblados. Si no están completamente saturadas, se repite el ensayo con nuevas probetas.

Para morteros distintos a los de renovación:

Se retiran las probetas del recipiente después de 10 min, se elimina rápidamente el agua superficial con un paño humedecido, se pesan las probetas (M1) y se retiran, inmediatamente, del recipiente. Se repite el mismo procedimiento después de 90 minutos y se pesan (M2).

Para los morteros distintos a los de renovación, el coeficiente de absorción de agua por capilaridad es, por definición, igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medidas tomadas después de 10 minutos y después de 90 minutos.

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

$$C = 0,1(M2 - M1) \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5} \text{ Ec.(6)}$$

3.5. Ensayos de resistencias mecánicas

3.5.1. Resistencia a flexión

La determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido viene dado por la norma UNE-EN 1015-11:2000 (UNE-EN 1015-11, 2000).

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

La máquina debe estar provista de dos rodillos de apoyo en acero, con una longitud comprendida entre 45 mm y 50 mm y un diámetro de 100mm $\pm 0,5$ mm, espaciados entre si 100 mm $\pm 0,5$ mm, y de un tercer rodillo de carga de la misma longitud y diámetro instalado centralmente entre los rodillos de apoyo. Los tres planos verticales que pasan por los ejes de los tres rodillos deben ser paralelos y permanecer paralelos durante el ensayo. Uno de los rodillos de apoyo y el rodillo de carga deben poder oscilar ligeramente para permitir una distribución uniforme de la carga sobre el total del ancho del prisma sin someterlo a un esfuerzo de torsión. En nuestro caso la máquina empleada es la MTS Insight 5 Material Test System del Laboratorio del Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales de la Universidad de Jaén Figura 11.

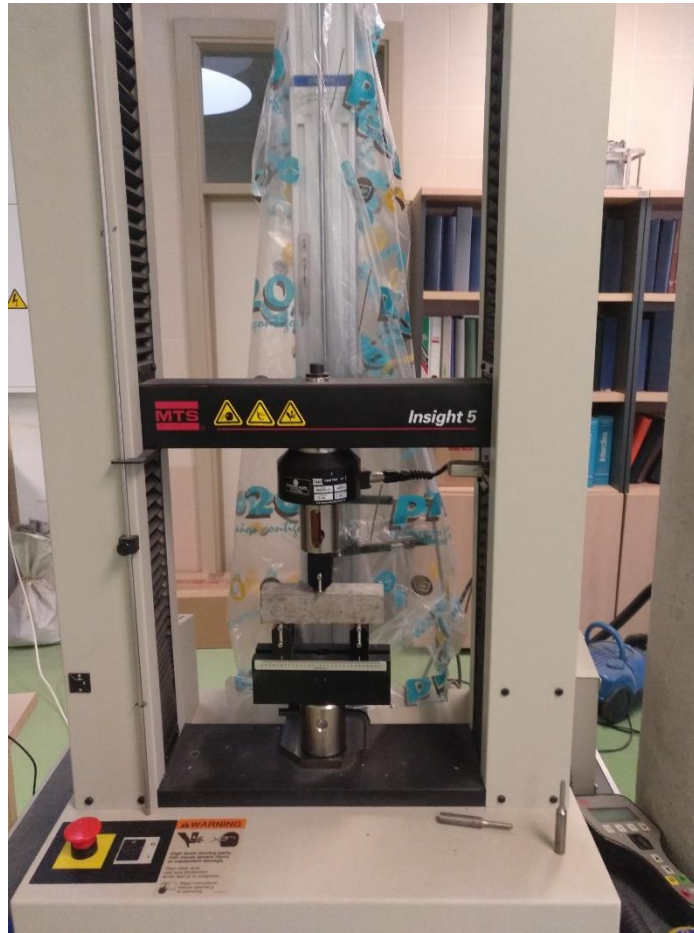


Ilustración 13. Máquina resistencia a flexión

A modo de preparación las superficies de contacto de los rodillos y las caras de la probeta se limpian con un paño limpio con el fin de eliminar las partículas o cualquier otro material no adherido. Una de las caras de la probeta (que ha estado en contacto con las paredes del molde durante el enmoldado) se coloca sobre los rodillos de apoyo

La carga se aplica sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s.

La carga máxima aplicada, en N se registra. Las mitades de la probeta partida se conservan para determinar la resistencia a compresión.

La resistencia a flexión f , en N/mm^2 se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \text{ Ec. (7)}$$

F es la carga máxima aplicada a la probeta en Newton (N).

L es la distancia entre los ejes de los rodillos de apoyo, en milímetros (mm).

b es el ancho de la probeta en milímetros (mm)

d es el grosor de la probeta en milímetros (mm)

En la figura 12 se puede ver una imagen del ensayo de resistencia a flexión. En él se puede ver cuál es la distancia entre los rodillos de apoyo.

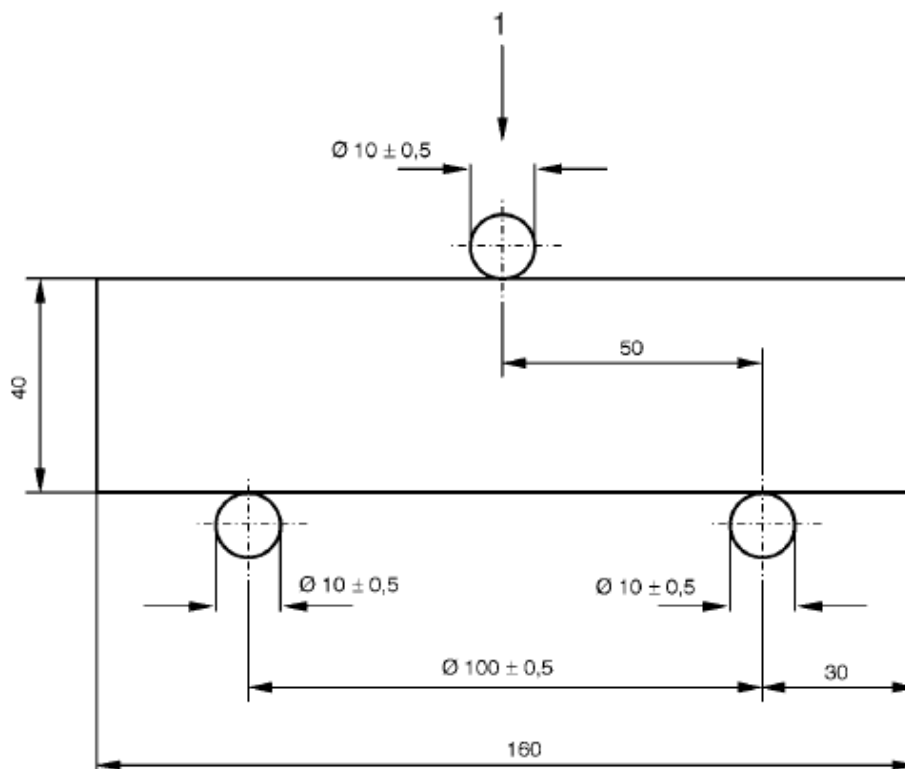


Ilustración 14. Ensayo resistencia a flexión

3.5.2. Resistencia a la compresión

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

A modo de preparación las partículas o cualquier otro material no adherido en las superficies de la probeta confeccionada se eliminan. La superficie de carga de la máquina de ensayo así como los platos de apoyo y el adaptador de ensayo se limpian con un paño limpio y se instala la probeta en la máquina de ensayo de tal modo que la carga se aplique en una de sus caras (la que ha estado en contacto con las paredes del molde durante el enmoldado).

El prisma se coloca de tal modo que la extremidad enmoldada se sitúe a $16\text{mm} \pm 0,1\text{ mm}$ del borde más próximo de los platos o de las placas de carga. Cualquier probeta que no forme un cubo de material sólido entre los platos superior e inferior o las placas de carga se elimina. La probeta se alinea, cuidadosamente de tal modo que la carga se aplique en todo el ancho de las caras en contacto con los platos. Cuando se utilizan las placas de carga y el adaptador para el ensayo, se coloca una placa de carga sobre la superficie superior del adaptador, su eje longitudinal debe ser paralelo a la flecha indicadora, asegurándose que entra en contacto riguroso en toda la superficie. La probeta se instala en el adaptador para el ensayo, entre los pilares, con su eje longitudinal perpendicular a la flecha, y se coloca la otra placa de carga sobre la probeta, paralelamente a la placa de carga inferior. El adaptador para el ensayo de compresión se centra cuidadosamente sobre el plato inferior de la máquina de ensayo.

La carga se aplica sin aceleraciones y se aumenta progresivamente a un ritmo comprendido entre 50 N/s y 500 N/s de tal modo que la rotura se produzca entre 30 y 90 s.

La resistencia se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta por su sección transversal.

La máquina utilizada para realizar este ensayo es 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.



Ilustración 15. Máquina ensayo compresión

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de las materias primas

4.1.1. Caracterización del cemento Portland

4.1.1.1. Humedad, pH, superficie específica y densidad relativa

En la tabla 6 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	2,84

Tabla 6. 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 han sido obtenidos por el método de Blaine (Cebrian y Pisonero, 1971). Estas 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

4.1.1.2. Distribución granulométrica

La distribución del tamaño de partícula del serrín se ajusta al de la arena normalizada. La Figura13 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 (< 2mm) del 11,95%, un 86,30% de partículas del tamaño del área y un 1,75% de partículas de tamaño de limo (Tabla 7), 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)

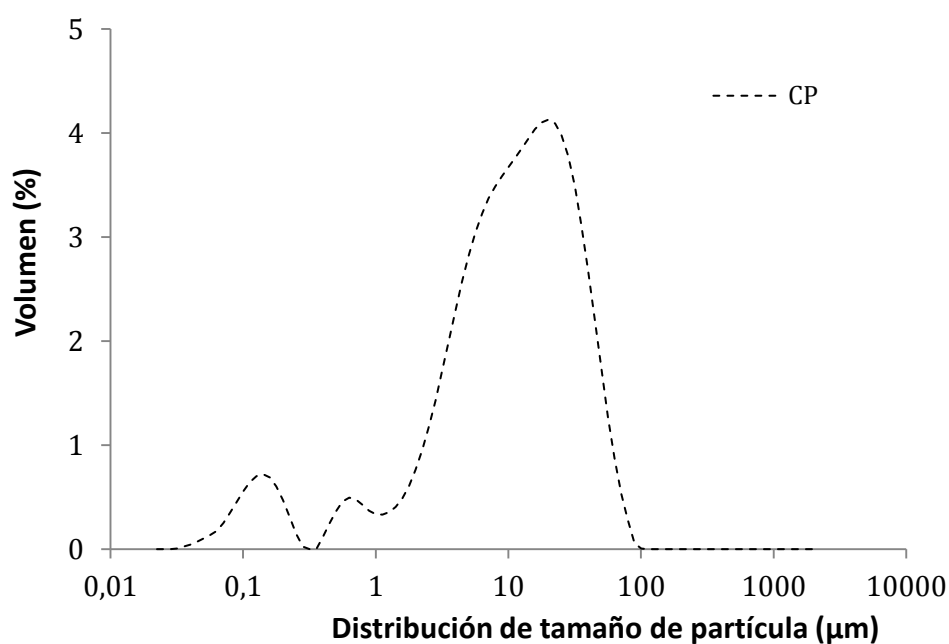


Ilustración 16. Distribución de tamaño de partícula del cemento Portland

Distribución del tamaño de partícula (mm)	CP
	(%)
Contenido de arcilla (<0,002)	11,95
Contenido de cal (0,002-0,0063)	86,3
Contenido de arena (0,063-2)	1,75

Tabla 7. Distribución de tamaño del cemento Portland

4.1.1.3. Análisis elemental (CHNS-O)

El análisis CHNS (Tabla 8) 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	0,16+-0,011	0,003+-0,038	0,42+-0,012

Tabla 8. Análisis elemental (CNHS-O) de los residuos

4.1.1.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se ha obtenido la composición química del cemento Portland mediante FRX (Tabla 9). 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 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 ₆	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 9. Composición química del cemento Portland

4.1.1.5. Caracterización mineralógica (DRX)

En el patrón de difracción del cemento Portland (Figura 14) 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).

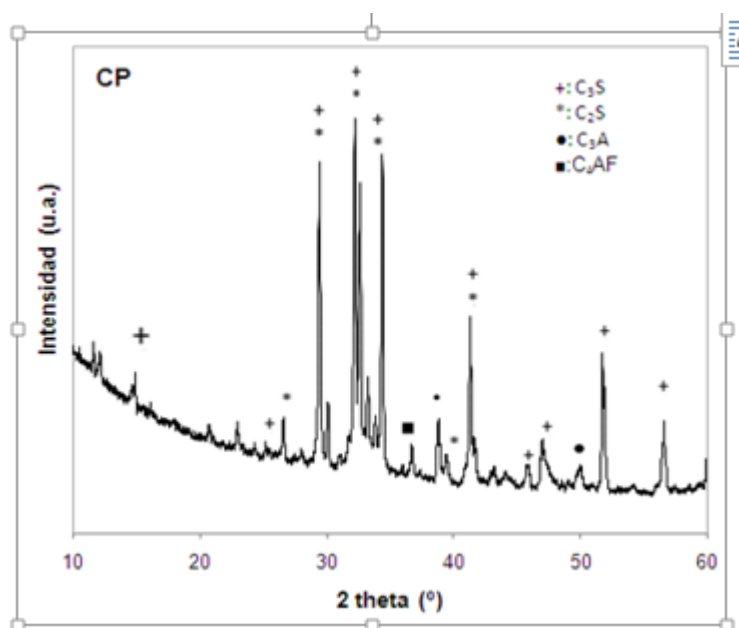


Ilustración 17. DRX del cemento Portland

4.1.1.6. Caracterización microestructural (SEM)

El estudio microestructural del cemento Portland se ha realizado mediante microscopía electrónica de barrido y análisis EDAX (Figura 15). 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 son más ricas en Si y Al, conteniendo menores cantidades de K.

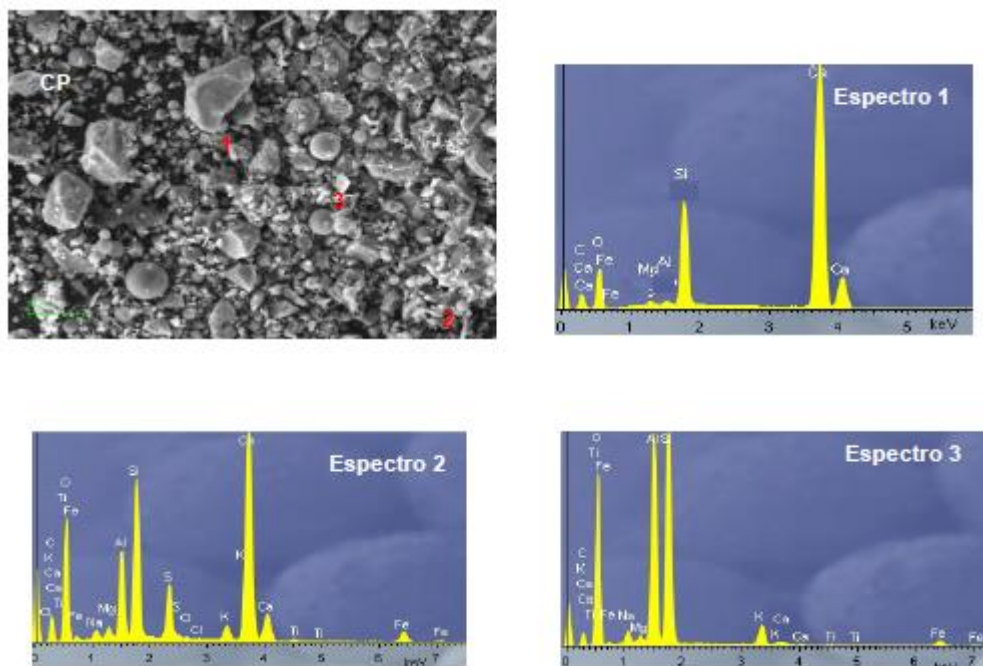


Ilustración 18. Imágenes SEM-EDAX del CP (4.5 Kx)

4.1.2. Caracterización del serrín

Para caracterizar el serrín se conoce su densidad. Se mide un volumen de 500 ml y se pesa obteniendo una masa de 149,055 g. Sabiendo que la densidad se calcula como masa entre volumen obtenemos que la densidad aparente del serrín es de 0,29811 g/ml.

4.2. Composición de las mezclas

Las probetas de mortero que han sido fabricadas en este TFG tienen un porcentaje de serrín del 5, 10, 15, y 20% en volumen que sustituye a una parte de la arena. Por otra parte hemos fabricado una probeta control con la cual compararemos resultados.

En la tabla 10 se muestra los distintos pesos de cada uno de los constituyentes que forman el mortero en función del porcentaje de serrín empleado.

% Serrín	Serrín(g)	Arena(g)	Cemento(g)	Agua(g)
0%	0	1350 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
5% tratado	11,9233	1282,5 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
10% tratado	23,85	1215 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
15% tratado	35,7732	1147,5 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
20% tratado	47,6976	1080 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
5% sin tratar	11,9233	1282,5 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
10% sin tratar	23,85	1215 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
15% sin tratar	35,7732	1147,5 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1
20% sin tratar	47,6976	1080 $\pm$ 5	450 $\pm$ 2	225 $\pm$ 1

Tabla 10. Peso de los componentes equivalentes a los porcentajes en volumen

La nomenclatura de las probetas que hemos fabricado tiene la siguiente estructura: en primer lugar aparece la letra F que representa la inicial de la persona que las fabrica, a continuación aparece 28 o 7 según cual sea el tiempo de curado, seguida de T o S según si el serrín se encuentra tratado o sin tratar, por último denotamos el porcentaje de serrín como 0, 5, 10, 15 o 20% en volumen (Figura 16). Por ejemplo (F280-Mortero de control de 28 días de curado; F7T5-Mortero con 5% de serrín tratado de 7 días de curado)



Ilustración 19. Nomenclatura usada en las probetas

4.3. Caracterización de los morteros

4.3.1 Absorción de agua por capilaridad

La capacidad de un mortero para atraer o 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 11 se muestra los datos de la absorción de agua por capilaridad expresado en $\text{kg/m}^2\text{min}^{0.5}$.

Probeta	28 días $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$	Desviación típica	7 días $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$	Desviación típica
F0	0,165	0,141	0,100	0,032
FS5	0,102	0,018	0,078	0,014
FT5	0,105	0,023	0,082	0,007
FS10	0,089	0,019	0,066	0,013
FT10	0,044	0,013	0,078	0,014
FS15	0,061	0,013	0,057	0,012
FT15	0,093	0,004	0,060	0,002
FS20	0,045	0,006	0,050	0,015
FT20	0,112	0,004	0,077	0,008

Tabla 11. Coeficiente de absorción de agua por capilaridad

Se puede observar en la tabla 11 y Figuras 20 y 21 que los morteros control presentan mayor absorción de agua por capilaridad para tiempos de curado de 7 y 28 días.

En el caso de los morteros que incorporan como sustituto de arena serrín sin tratar se observa como a medida que se incrementa el contenido en serrín la absorción de agua por capilaridad del mortero disminuye desde $0,1 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ para el mortero control hasta $0,050 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ con la adición del 20% en volumen de serrín tras 7 días de curado y desde $0,165 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ para el mortero de control hasta $0,045 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ para el mortero con 20% en volumen de serrín tras 28 días de curado, lo que supone una reducción del 50 y 72,7 % respectivamente.

En los morteros que incorporan serrín tratado se observa que la absorción de agua por capilaridad apenas se ve influenciada por el contenido en volumen de serrín tratado obteniendo valores ligeramente inferiores de esta propiedad para las probetas con 15 y 10% en volumen de serrín pretratado tras 7 y 28 días de curado respectivamente.

En cuanto a la influencia del pretratamiento en la absorción de agua por capilaridad no sigue ninguna tendencia, mientras que tras 7 días de curado la

incorporación de hasta 15% de serrín tratado produce probetas con menor absorción de agua por capilaridad que las que contienen serrín sin tratar, tras 28 días de curado a excepción de la probeta que incorpora un 10% en volumen de serrín tratado que presentan una ligera mayor absorción de agua por capilaridad.

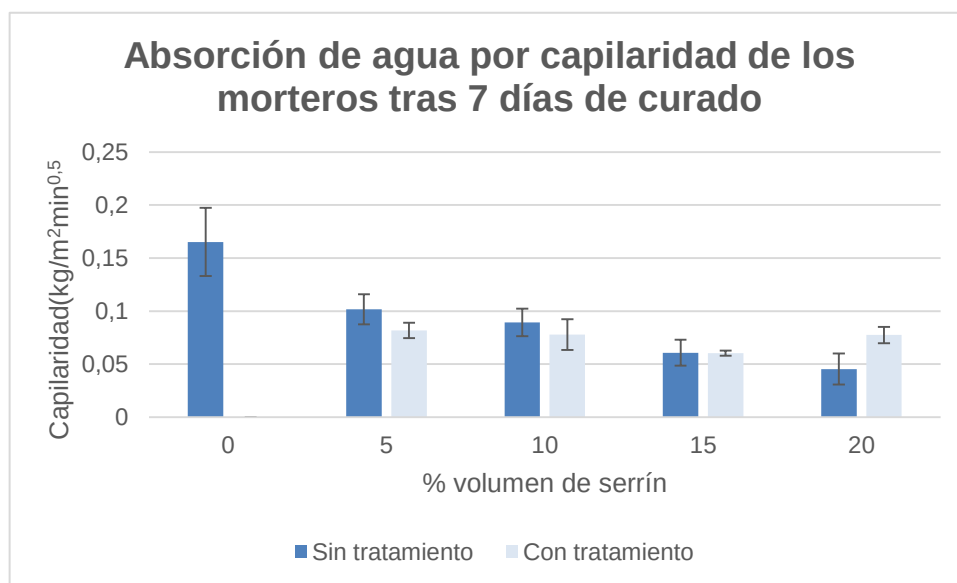


Ilustración 20. Absorción de agua por capilaridad en probetas de 7 días de curado

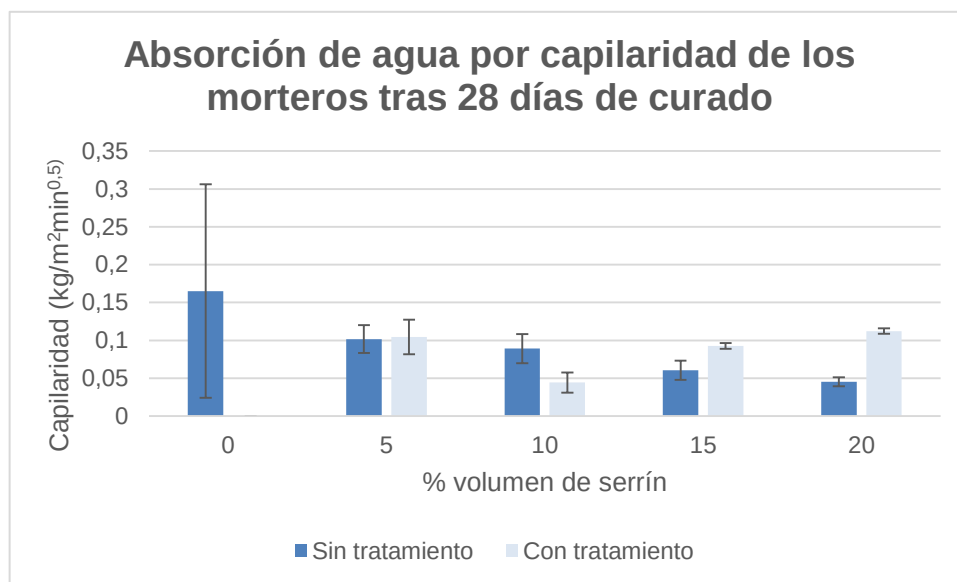


Ilustración 21. Absorción de agua por capilaridad en probetas de 28 días de curado

En cuanto a la influencia del tiempo de curado se observa que la absorción de agua por capilaridad incrementa ligeramente con el tiempo de curado, lo que podría indicar, de acuerdo con los datos de densidad aparente que a los 7 días de curado los

silicatos cálcicos hidratados fase responsable de que la red de poros sea más compacta prácticamente se han formado.

La norma UNE-EN 998-1:2010 (UNE-EN 998-1, 2010) divide los morteros de albañilería para revoco y enlucido en tres categorías según su coeficiente de absorción de agua por capilaridad (Tabla 12)

Propiedades	Categorías	Valores
Intervalo de resistencia compresión a 28 días	CS I	0,4 a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 a 5,0 N/mm ²
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Absorción de agua por capilaridad	W 0	No especificado
	W 1	$c \leq 0,40 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
	W 2	$c \leq 0,20 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Conductividad térmica	T 1	≤ 0,1 W/m·K
	T 2	≤ 0,2 W/m·K

Tabla 12. Clasificación de los morteros según la norma UNE-EN 998-1

Como todas las probetas tienen un coeficiente de absorción por capilaridad menor a $0,20 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ pertenecen a la categoría W2.

4.3.2. Densidad aparente

La densidad aparente depende de la densidad de los componentes que constituyen el mortero: serrín y arena, así como de la granulometría y el volumen que ocupen en su dosificación. La relación agua/cemento también influye en la densidad aparente, cuanto mayor es esta relación, más poroso será el mortero.

En la tabla 13 y figuras 22 y 23 se pueden ver los datos de la densidad aparente en kg/m^3 para las probetas de mortero control y las probetas que incorporan distintas cantidades de serrín tratado y sin tratar.

Probeta	28 días Kg/m ³	Desviación típica	7 días Kg/m ³	Desviación típica
F0	2245,50	5,16	2232,99	0,77
FS5	1975,85	1,19	1985,39	2,28
FT5	2057,29	5,97	2052,52	5,84
FS10	1936,29	1,23	1945,09	1,73
FT10	1982,25	5,35	1999,10	4,61
FS15	1902,00	2,68	1914,47	7,92
FT15	1968,96	8,34	1975,21	5,69
FS20	1958,81	9,19	1965,20	5,75
FT20	1844,55	4,76	1849,00	6,31

Tabla 13. Densidad aparente de las probetas ensayadas

Se puede observar que la densidad aparente del mortero control 2233 y 2246 kg/m³ tras 7 y 28 días de curado, respectivamente, disminuye con la adición del residuo serrín, sin embargo la densidad prácticamente no se modifica con la adición de mayores cantidades de residuo. La disminución de la densidad aparente puede ser debido a la menor densidad aparente del serrín, 298 kg/m³, con respecto a la de la arena, 1688 kg/m³, ya que la cantidad de agua adicionada a las pastas permanece constante.

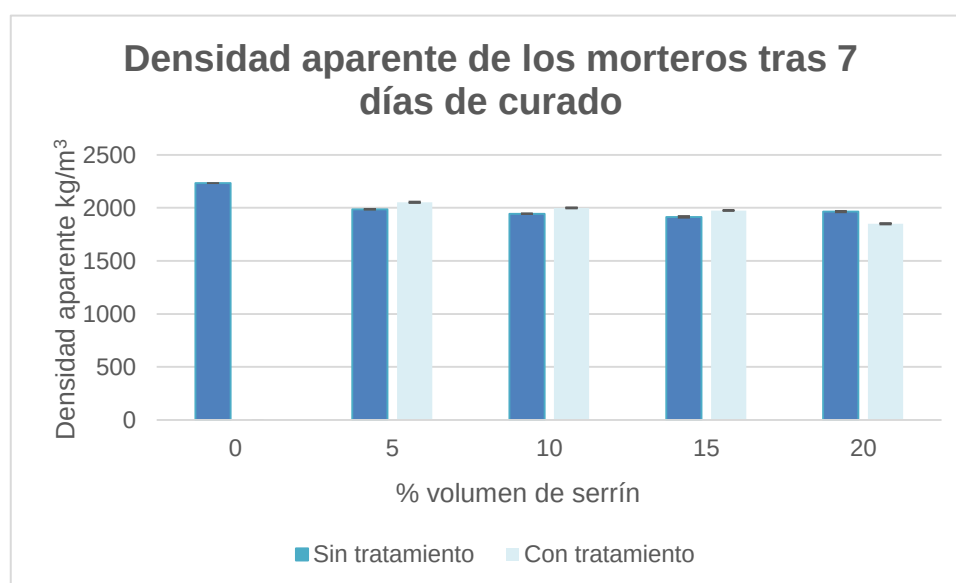


Ilustración 22. Densidad aparente en probetas de 7 días de curado

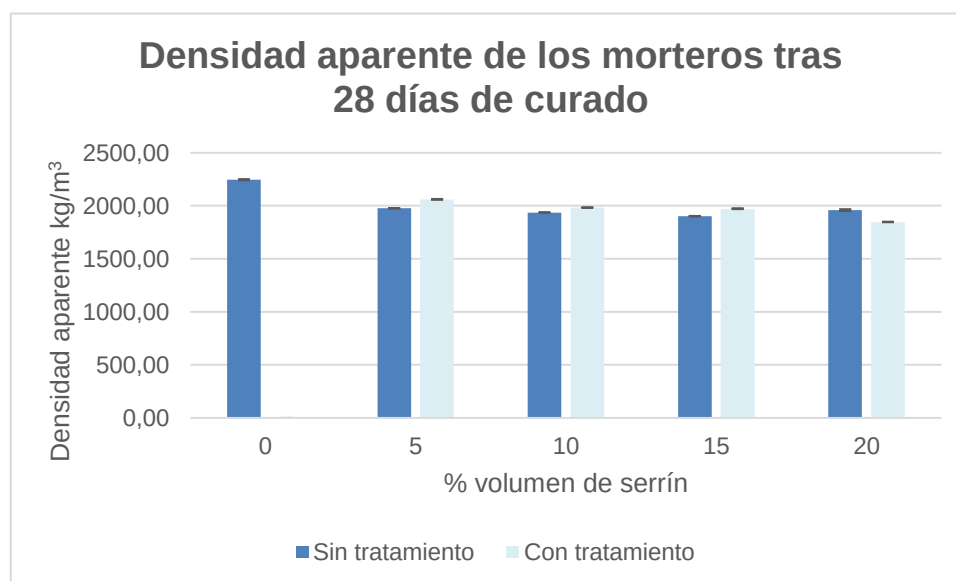


Ilustración 23. Densidad aparente en probetas de 28 días de curado

En cuanto a la influencia del pretratamiento, se puede observar que la densidad aparente de los morteros que incorporan hasta el 15% en volumen del residuo serrín pretratado es ligeramente superior, siendo las diferencias de densidades inferiores al 5%.

Con respecto al comportamiento de los morteros con el tiempo de curado, se puede observar que la densidad aparente de los morteros control y de los morteros con incorporación del residuo serrín tratado y sin tratar apenas se modifica con el tiempo de curado. Esto puede ser debido a que para un tiempo de curado de 7 días, las reacciones de hidratación que darían lugar a los silicatos cálcicos hidratados, fases CSH, casi se han completado y los morteros presentan prácticamente la misma red de poros.

Considerando que la máxima densidad aparente para morteros aligerados es 1300 kg/m³ según la Norma UNE-EN 988-2:2012 (UNE-EN 988-2, 2012), ninguno de los morteros elaborados será ligero ya que la probeta que presenta una menor densidad es la que contiene un 20% en volumen de serrín tratado para un tiempo de curado de 28 días y su valor es de 1844kg/m³.

4.3.3. Resistencia a flexión

Para calcular la resistencia a flexión hemos empleado la ecuación (7:)

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

Sabiendo que la distancia entre rodillos, l , es de 100 mm y la sección transversal de la probeta, b y d , es 40x40 mm.

En la tabla 14 y figuras 24 y 25 se pueden ver los resultados obtenidos para la resistencia a flexión en función del porcentaje de serrín tratado y sin tratar para los tiempos de curado de 7 y 28 días.

Probeta	28 días MPa	Desviación típica	7 días MPa	Desviación típica
F0	5,93	0,05	5,43	0,27
FS5	5,14	0,17	5,04	0,36
FT5	5,00	0,66	4,87	0,50
FS10	4,56	0,23	5,44	0,33
FT10	4,29	0,36	4,59	0,69
FS15	5,24	0,28	5,65	0,19
FT15	3,45	0,21	4,02	0,43
FS20	4,67	0,17	5,52	0,77
FT20	3,25	0,41	4,21	0,16

Tabla 14. Resistencia a flexión de las probetas de mortero

Se puede observar que la resistencia a flexión de las probetas control es de 5,43 y 5,93 MPa para tiempos de curado de 7 y 28 días respectivamente, lo que indica que esta propiedad mecánica prácticamente no se modifica con el tiempo de curado. La adición de serrín tratado a tiempos de curado de 7 y 28 días y de serrín sin tratar para tiempos de curado de 28 días da lugar a probetas de mortero con menor resistencia a flexión, siendo esta disminución más significativa en los morteros que incorporan serrín tratado, lo que podría indicar que no se ha llevado a cabo una mineralización correcta del serrín, no integrándose el material durante el endurecimiento de la mezcla actuando como concentradores de tensiones provocando una disminución de esta propiedad mecánica. No obstante, la resistencia a flexión de los morteros que

incorporan serrín sin tratar tras 7 días de curado presentan valores similares o incluso ligeramente superiores que el mortero control.

Por tanto, la resistencia a flexión de los morteros sigue una tendencia diferente cuando al mortero se adiciona serrín tratado y sin tratar. En los morteros que incorporan serrín tratado, se observa una disminución progresiva en la resistencia a la flexión a medida que se incorporan cantidades crecientes de residuo, así cuando se incorpora el 15% en volumen de serrín hay una disminución de la resistencia a flexión del 26% para los morteros curados durante 7 días, incrementándose hasta el 42% para los morteros curados durante 28 días con respecto a los morteros control. Sin embargo, cuando se adiciona serrín sin tratar, la resistencia a flexión apenas se modifica con el incremento de serrín adicionado a los 7 días de curado obteniendo valores de resistencia a flexión similares o incluso ligeramente superiores al mortero control. Para tiempos de curado de 28 días se obtienen valores de resistencia a flexión ligeramente inferiores al mortero control, obteniendo los valores más altos de esta propiedad, 5 y 5,2 MPa con la incorporación del 5 y 15 % en volumen de serrín sin tratar, respectivamente.

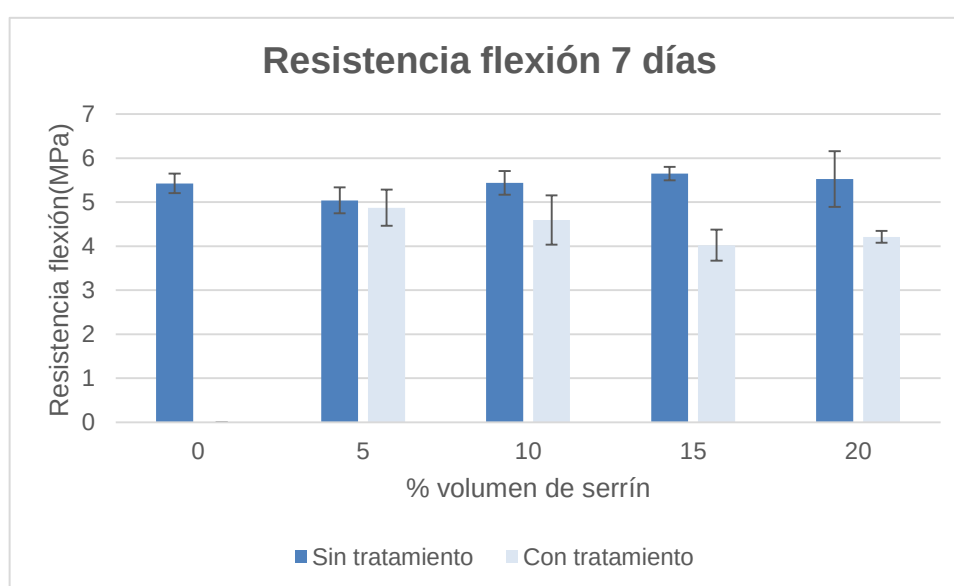


Ilustración 24. Resistencia a flexión en probetas de 7 días de curado

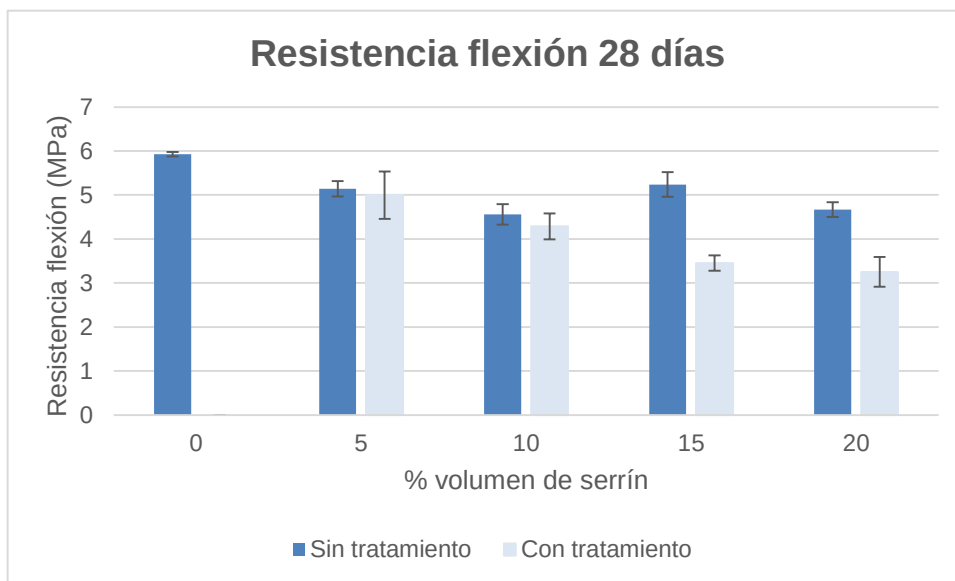


Ilustración 25. Resistencia a flexión en probetas de 28 días de curado

En la figura 26 se puede observar la tendencia que siguen las probetas de mortero para los dos tiempos de curado (7 y 28 días) según el porcentaje de serrín tratado y sin tratar adicionado.

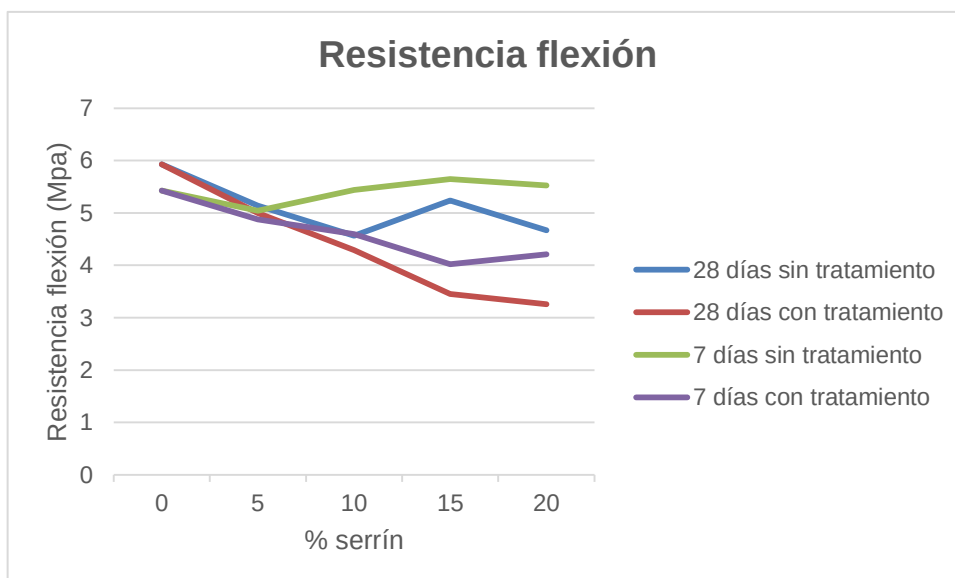


Ilustración 26. Tendencia de la resistencia a flexión en probetas

Se puede observar como las probetas de mortero que incorporan serrín sin tratamiento presentan mayores valores de resistencia a flexión para tiempos de curado de 7 y 28 días. La resistencia a flexión disminuye con el tiempo de curado para todos los morteros, lo que indica que el residuo serrín tanto sin tratamiento como con tratamiento no se ha integrado durante el endurecimiento del cemento en el material, concentrando tensiones y empeorando las propiedades mecánicas.

4.3.4. Resistencia a la compresión

En la tabla 15 y figuras 27 y 28 se pueden ver los resultados obtenidos tras el ensayo de resistencia a compresión de las probetas de mortero control y de las probetas que contiene un 5-20% en volumen de serrín tratado y sin tratar tras 7 y 28 días de curado.

Probeta	28 días	Desviación típica	7 días	Desviación típica
F0	38,17	8,75	35,13	7,05
FS5	21,03	4,16	24,01	3,69
FT5	28,55	4,77	25,19	12,06
FS10	21,64	3,19	20,43	4,78
FT10	25,85	4,48	25,87	3,48
FS15	19,47	4,50	20,43	1,94
FT15	21,04	4,22	18,28	3,19
FS20	18,72	5,62	20,50	8,25
FT20	15,87	4,16	17,00	2,57

Tabla 15. Medias de resistencia a compresión de las probetas

La resistencia de compresión se calcula dividiendo la carga máxima que aplica la máquina sobre la probeta por la sección transversal de esta. La sección es de 40x40 mm.

La resistencia a compresión del mortero control es de 35,2 y 38,2 MPa para un tiempo de curado de 7 y 28 días, respectivamente. La incorporación de serrín tanto tratado como sin tratar en el mortero produce una disminución de la resistencia a compresión tanto mayor cuanto mayor es la cantidad de residuo adicionado. La disminución de la resistencia a compresión a medida que se incrementa el contenido en residuo puede atribuirse a la disminución de la densidad aparente de los morteros

y a la falta de adhesión entre el serrín y el cemento, así como a la reducción de silicatos de calcio hidratados (CHS) formados, lo que produce una reducción del volumen de material cementante hidratado en los morteros. Esta disminución es más notable en los morteros que incorporan serrín sin tratar. El tratamiento de mineralización del serrín con una disolución del 10% de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puede dar lugar a una ligera mayor compatibilidad química del residuo con el cemento incrementando ligeramente la resistencia a compresión. Así para los morteros con serrín sin tratar la incorporación del 5% en volumen de serrín produce un descenso del 31,7% y del 44,9% para tiempos de curado de 7 y 28 días respectivamente, mientras que para los morteros que incorporan un 5% en volumen de serrín tratado la disminución es del 28,3% y del 25,2% para tiempos de curado de 7 y 28 días respectivamente.

Por tanto, se observa una disminución de la resistencia de compresión a medida que aumenta el porcentaje de serrín. Esta disminución en el caso de las probetas que presentan serrín tratado es menor. El tratamiento del serrín con una disolución del 10 % de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nos da mejores resultados de resistencia a la compresión que las probetas que presentan serrín sin tratar.

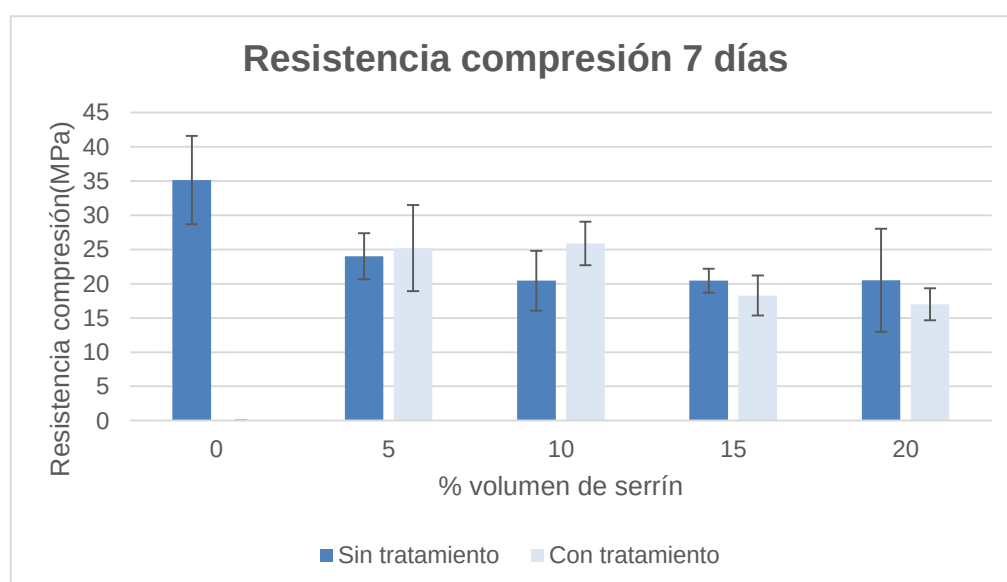


Ilustración 27. Resistencia a compresión en probetas de 7 días de curado

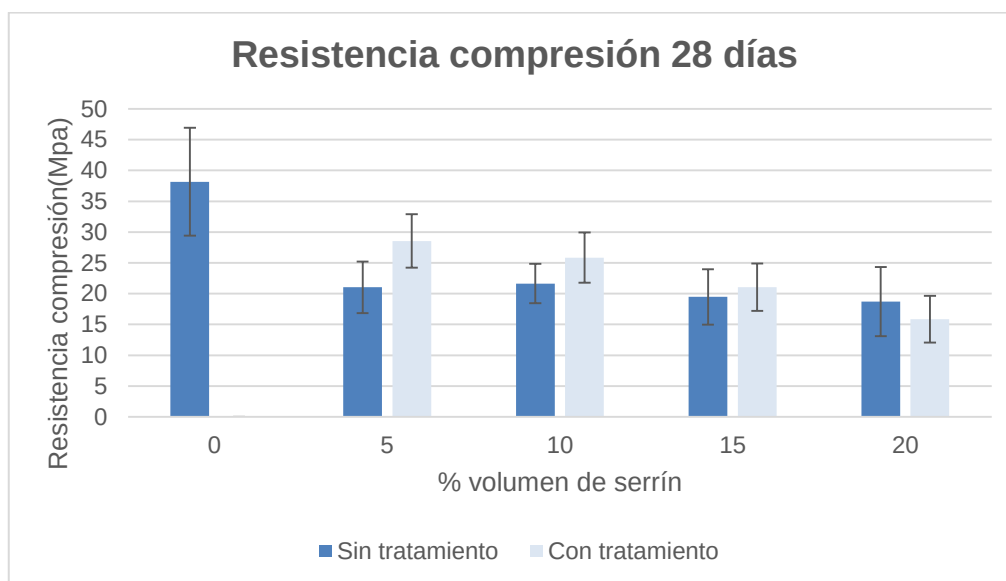


Ilustración 28. Resistencia a compresión en probetas de 28 días de curado

En cuanto a la influencia del tiempo de curado (Figura 29) se observa que la resistencia a compresión apenas se modifica con el tiempo de curado debido posiblemente a que a un tiempo de curado de 7 días prácticamente se han completado las reacciones de hidratación del cemento Portland lo que contribuye a una resistencia temprana de los morteros.

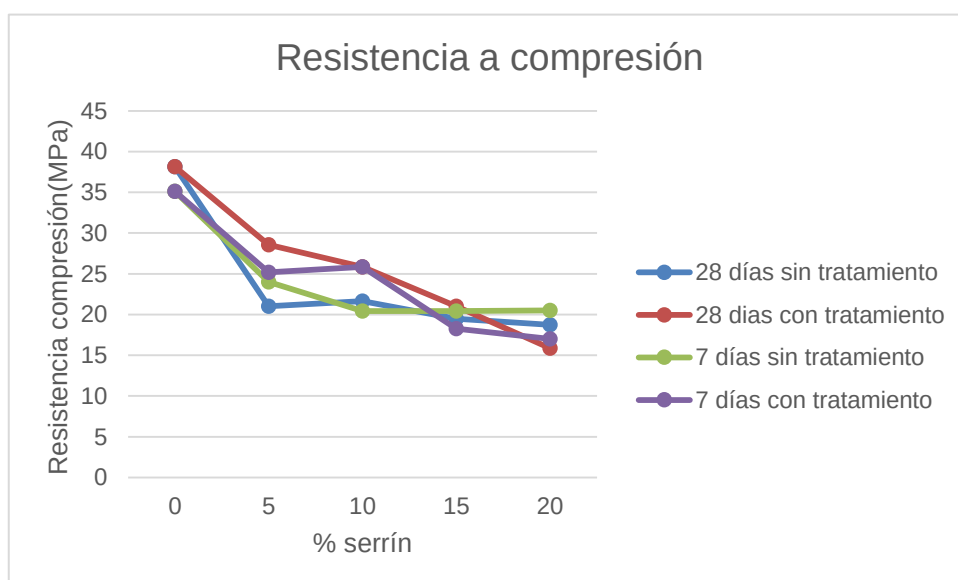


Ilustración 29. Tendencia de la resistencia a compresión en probetas

La norma UNE-EN 998-1:2010 (UNE-EN 998-1, 2010) establece que los morteros deben tener una resistencia a la compresión mínima de 6 MPa para su

empleo en juntas. Por lo que, todos los morteros con adición de hasta el 20% en volumen de serrín tratado y sin tratar cumplen este requisito de diseño. Además esta norma divide los morteros de albañilería para revoco y enlucido en cuatro categorías según su resistencia a la compresión, tal como se muestra en la tabla 12. Todos los morteros son tipo CSIV ya que presentan una resistencia a compresión superior a 6 MPa.

4.4. Estudio económico

Por último se va a realizar un estudio económico meramente orientativo de las probetas para cada una de las composiciones ensayadas.

Resulta interesante comparar el precio de los morteros control con el precio que tendrían los morteros cuando sustituimos parte de la arena por serrín en los porcentajes del 5-20% en volumen.

De los factores que influyen en el precio final de un mortero de cemento, se ha realizado una valoración del coste de las materias primas. El precio de los materiales que se han utilizado se ha consultado en diversas empresas de suministro de la construcción. En el caso del serrín como se trata de un residuo solo se ha tenido en cuenta el coste de su transporte.

Según la tarifa de precios de reciclaje de residuos de construcción el precio del serrín es de 25€/tn.

En la tabla 16 se muestre el coste en euros por cada metro cúbico de mortero

Componentes	€/tn	ρ (tn/m ³)	€/m ³
Cemento	96,81	1,1	106,25
Arena	14,75	1,8	26,55
Serrín	25	0,3	7,5
Agua	1,27	1	1,27

Tabla 16. Coste de los componentes del cemento

A continuación vamos a hacer un desglose de precios para cada una de las probetas de mortero fabricadas con el fin de comparar con la probeta control. En todos los casos la cantidad de cemento no varía, va a permanecer constante durante todo el estudio económico.

En las tablas 17, 18, 19, 20, 21 se desarrolla los precios de cada una de las probetas teniendo en cuenta la composición volumétrica del mortero.

M0	%Volumétrico	Coste (€/m ³)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,542	26,55	14,39
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0	0	0,00
			46,05

Tabla 17. Coste por metro cúbico del mortero de control

M5	%Volumétrico	Coste (€/m ³)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,5149	26,55	13,67
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,0271	0,20325	0,01
			45,33

Tabla 18. Coste por metro cúbico de mortero con 5% de serrín

M10	%Volumétrico	Coste (€/m3)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,4878	26,55	12,95
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,0542	0,4065	0,02
			44,63

Tabla 19. Coste por metro cúbico de mortero con 10% de serrín

M15	%Volumétrico	Coste (€/m3)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,4607	26,55	12,23
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,0813	0,60975	0,05
			43,94

Tabla 20. Coste por metro cúbico de mortero con 15% de serrín

M20	%Volumétrico	Coste (€/m3)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,4336	26,55	11,51
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,1084	0,813	0,09
			43,26

Tabla 21. Coste por metro cúbico de mortero con 20% de serrín

Como se puede observar a medida que aumenta el porcentaje de serrín el coste por metro cubico de mortero es más económico, ya que, el serrín es más barato que la arena al tratarse de un residuo procedente de la industria de la madera.

A continuación vamos a estudiar el coste por metro cúbico de las probetas que presentan serrín tratado. Sabiendo que el precio del hidróxido cálcico es de 0,5 €/kg

y que en cada litro de disolución hay 10 gramos de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se obtiene que el precio por metro cúbico es de 5 €/m³ aproximadamente.

En las tablas 22, 23, 24, 25 se puede ver es desglose del coste por metro cúbico de cada una de las probetas según el porcentaje de serrín tratado.

M5	%Volumétrico	Coste (€/m ³)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,5149	26,55	13,67
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,0271	12,5	0,34
			45,67

Tabla 22. Coste por metro cúbico de mortero con 5% de serrín tratado

M10	%Volumétrico	Coste (€/m ³)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,4878	26,55	12,95
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,0542	12,5	0,68
			45,29

Tabla 23. Coste por metro cúbico de mortero con 10 % serrín tratado

M15	%Volumétrico	Coste (€/m ³)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,4607	26,55	12,23
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,0813	12,5	1,02
			44,90

Tabla 24. Coste por metro cúbico de mortero con 15% de serrín tratado

M20	%Volumétrico	Coste (€/m ³)	Precio(€)
Cemento	0,296	106,25	31,45
Arena	0,4336	26,55	11,51
Agua	0,163	1,27	0,21
Serrín	0,1084	12,5	1,36
			44,52

Tabla 25 . Coste por metro cúbico de mortero con 20% de serrín tratado

En la gráfica 30 se puede ver que las probetas que presentan serrín tratado tiene un precio mayor, debido al coste del pretratamiento, con respecto a los morteros que incorporan serrín sin tratar, sin embargo su coste sigue siendo inferior al precio del mortero control.

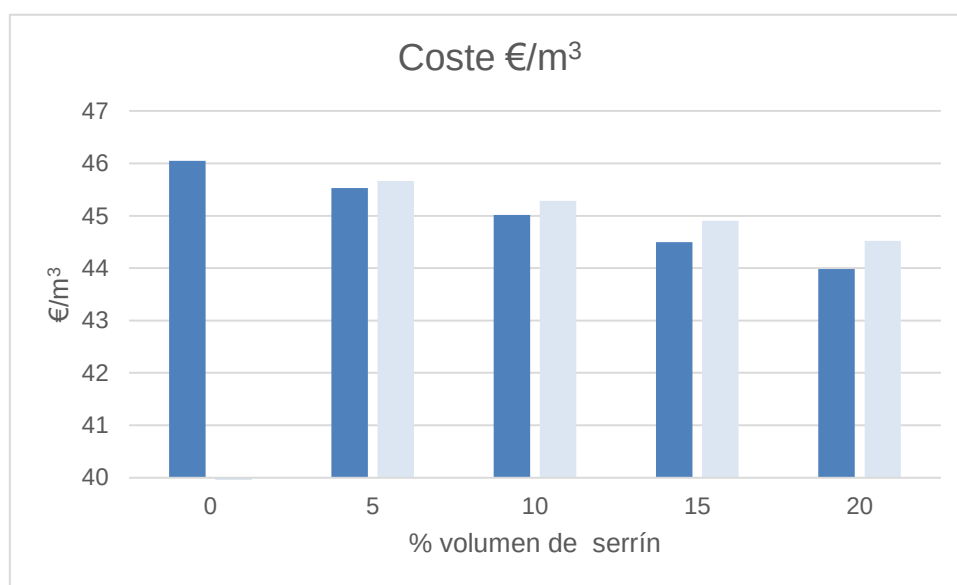


Ilustración 30. Comparación de precios de las probetas con y sin tratamiento

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados experimentales de las probetas de mortero que presentan serrín pretratado y sin pretratar como sustituto del árido arena se extraen las siguientes conclusiones:

- La absorción de agua por capilaridad en los morteros que incorporan como sustituto de arena serrín sin tratar disminuye a medida que se incrementa el contenido de serrín. Sin embargo, en los morteros que incorporan serrín pretratado se observa que la absorción de agua por capilaridad apenas se ve influenciada por el contenido en volumen de serrín tratado obteniendo valores ligeramente inferiores de esta propiedad para las probetas que incorporan un 10 y un 15% en volumen de serrín tras 7 y 28 días de curado, respectivamente. En cuanto a la influencia del tiempo de curado se observa un ligero incremento de esta propiedad con el tiempo de curado.

- La densidad aparente de los morteros con adición de serrín disminuye con respecto a la densidad del mortero control, sin embargo prácticamente no se modifica con la incorporación de cantidades crecientes de residuo.. La disminución de la densidad aparente puede ser debido a la menor densidad aparente del serrín 298 kg/m^3 , con respecto a la de la arena, 1688 kg/m^3 ya que la cantidad de agua adicionada a la pastas permanece constante. En cuanto a la influencia del pretratamiento, se aprecia que la densidad aparente de los morteros que incorporan hasta el 15% en volumen del residuo pretratado es ligeramente superior. Se observa además que la densidad apenas se modifica con el tiempo de curado. Ninguna de los morteros se pueden clasificar como ligeros, ya que, todas las probetas tienen una densidad superior a 1300 kg/m^3 .
- La resistencia a flexión es superior en los morteros que incorporan serrín sin pretratamiento. Mientras que la resistencia a flexión disminuye con la incorporación de cantidades crecientes de serrín pretratado, la resistencia a flexión apenas se modifica con la cantidad de serrín sin tratar adicionado. Esto podría indicar que no se ha llevado una mineralización correcta del residuo. Además la resistencia a flexión disminuye con el tiempo de curado, lo que podría ser debido a que el residuo no se ha integrado durante el endurecimiento del cemento concentrando tensiones y disminuyendo esta propiedad mecánica.
- La resistencia a compresión de los morteros disminuye a medida que se incrementa la cantidad de residuo adicionado debido posiblemente a la disminución de la densidad aparente, la falta de adhesión serrín-cemento y la reducción del volumen de CHS. Los morteros a los que se le adiciona serrín pretratado presentan mejores propiedades mecánicas a compresión que los morteros que incorporan serrín sin pretratar, debido posiblemente a la mayor compatibilidad química del residuo con el cemento Portland.
- El porcentaje óptimo de serrín a incorporar en las probetas de mortero de cemento Portland en sustitución del árido arena es del 5 % en volumen sometido al pretratamiento con hidróxido cálcico, ya que los morteros tras 28 días de curado, presentan valores elevados de resistencia a

compresión (28,5 MPa) y de resistencia a flexión (5.0 MPa), ligeramente inferiores a los que presentan los morteros control, obteniendo morteros con mejores propiedades físicas al producir materiales de construcción con menores valores de densidad aparente y de absorción de agua por capilaridad y con respecto al mortero control.

- El uso de serrín como componente del mortero y sustituto parcial de la arena produce un importante beneficio ambiental, ya que se aprovecharía gran cantidad de residuos de la madera en la industria de la construcción disminuyendo extracción de arena y grava.
- El coste de los morteros disminuye a medida que va aumentando el porcentaje de residuo serrín 5, 10,15 y 20 % en volumen. Las probetas que han sido pretratadas resultan ligeramente más caras debido al coste adicional del reactivo hidróxido cálcico empleado en el pretratamiento, aunque los morteros resultan tener un precio más económico que los morteros control.

Bibliografía

Agarwal S. Actividad puzolánica de diversos materiales silíceos (2006). Cem Concr Res, 36, 1735-1739.

Cebrián J.L., Pisonero F. Determination of specific surface by Blaine's method in the case of flying ashes and pozzolan cements (1971)

Gaspar-Tebar, D. (1984): Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Materiales de Construcción; julio-agosto septiembre, 195, 31-40.

Gatani, M., Argüello, R., Sesín, S., Materiales compuestos de cáscara de maní y cemento. Influencia de diferentes tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas, Materiales de Construcción, Vol. 60, 298, pp. 137-147, abril-junio 2010.

González De La Coteria, M., Morteros ligeros de cáscara de arroz. IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Lima, Perú, 1-10, Noviembre 1982.

Ordoñez, L. M., Reutilización de la Ceniza de Cáscara de Arroz como material de Construcción: Valoración y Optimización de sus Propiedades Puzolánicas [PhD Thesis]. Universidad Politécnica de Valencia, 2007.

Rodríguez-Mora O, Morteros: guía general (2003)

Treviño, B., Gómez, I., Obtención de fases del cemento utilizando desechos agrícolas e industriales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. Vol. V, No. 2, pp. 190-196, abril 2002.

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 933-1:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado

UNE-EN 933-2:1996 Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

UNE-EN 934-2:2010. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad marcado y etiquetado.

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

UNE-EN 1015-2:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo

UNE-EN 1015-3:2000 Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)

UNE-EN 1015-6.:1999/A1:2007 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco

UNE-EN 1015-9:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco.

UNE-EN 1015-11:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido

UNE-EN 1015-12:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros de revoco y enlucido endurecido aplicado sobre soportes

UNE-EN 1015-17:2001 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 17: Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de los morteros frescos.

UNE-EN 1015-18: 2003 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

UNE-EN 1015-19:1999 Metodos de ensayo de los morteros para albañilería Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido

UNE-EN 1347:2008 Adhesivos para baldosas cerámicas. Determinación de la capacidad humectante.

UNE-EN 13139:2003 Áridos para morteros

UNE-EN 23093 Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales

Páginas webs visitadas

http://www.preoc.es/download/ADS/D13DD080/designaci%F3n%20de%20morteros.pdf?cookie_check=1

file:///C:/Users/Pc/Downloads/42986_listado-de-precios-1-enero-de-2016.pdf

https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hormigon/Temas/Morteros.pdf

<http://www.biblioteca.org.ar/libros/211379.pdf>

<http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/cemento.pdf>

file:///C:/Users/Pc/Downloads/42986_listado-de-precios-1-enero-de-2016.pdf

https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hormigon/Temas/Morteros.pdf

<http://www.biblioteca.org.ar/libros/211379.pdf>

<http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/cemento.pdf>

<http://personales.upv.es/fbardisa/Pdf/Composici%C3%B3n%20Cementos.PDF>