



# **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MORTEROS FABRICADOS A BASE DE FILITA”**

AUTOR:

**NORBERTO ESCOBAR FERNÁNDEZ**

DIRECTOR DEL PROYECTO:

**EDUARDO GARZÓN GARZÓN**

**UNIVERSIDAD DE ALMERÍA**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>CAPÍTULO 1. INTERÉS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTERÉS .....	2
1.2. OBJETIVOS.....	2
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. LOCALIZACIÓN DE FILITAS.....	4
2.2. APLICACIONES DE LAS FILITAS.....	4
2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS.....	5
2.4. MORTEROS.....	8
2.4.1. Generalidades.....	8
2.4.2. Morteros impermeabilizantes.....	8
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
3.1. TAMIZADO Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	11
3.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL MORTERO.....	11
3.3. RETENCIÓN DE AGUA DEL MORTERO.....	13
3.4. CONSISTENCIA DEL MORTERO.....	15
3.5. RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN.....	16
3.6. ANÁLISIS DEL MORTERO MEDIANTE MEB.....	17
3.7. MÉTODO DE ADSORCIÓN DE GAS NITRÓGENO.....	18
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>19</b>
4.1. TAMIZADO Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	20
4.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.....	20
4.3. RETENCIÓN DE AGUA DEL MORTERO.....	22
4.4. CONSISTENCIA DEL MORTERO.....	24
4.5. RESISTENCIA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN.....	26
4.6. ANÁLISIS DEL MORTERO MEDIANTE MEB.....	30
4.7. MÉTODO DE ADSORCIÓN DE GAS NITRÓGENO.....	31
4.8. VIABILIDAD ECONÓMICA.....	32
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>37</b>



# CAPÍTULO 1. INTERÉS Y OBJETIVOS

---

## **1.1. INTERÉS**

Almería se encuentra en una zona abundante en cuanto a la presencia de filitas, las filitas forman parte de toda la sierra de la Alpujarra tanto almeriense como granadina a demás de la zona de Sierra Alhamilla.

Las filitas han sido usadas como material básico para la construcción de todos los pueblos de la alpujarra por los habitantes de dichos pueblos. También se han empleado para la construcción de todo tipo de obras hidráulicas por su capacidad impermeabilizante, pero su aplicación se ha realizado siempre de forma muy basta mediante aplicación directa de la tierra natural sin combinación con ningún otro material que mejore sus cualidades mecánicas limitando su uso como material de revestimiento.

La poca evolución que ha tenido el uso de las filitas a pesar de su gran utilidad y aceptación social, hace que sea un material con grandísimo potencial de evolución para su uso generalizado en la construcción de todo tipo de obras hidráulicas relacionadas con la agricultura, tan abundante en Almería, además de su empleo en la construcción y reconstrucción de viviendas típicas alpujarreñas.

De conseguir un mortero de cuya composición forme parte la filita y posea unas propiedades mecánicas y de trabajabilidad propias de los morteros ya existentes al mismo tiempo que conserve las propiedades impermeabilizantes de la filita, obtendríamos un producto fácil de fabricar y con un mercado muy amplio al que satisfacer.

La finalidad de este estudio es realizar una serie de ensayos muy simples para comprobar que las ideas de las que se parte son correctas y sobre todo como base para estudios posteriores que se realicen de manera más exhaustiva y con más detenimiento.

## **1.2. OBJETIVOS**

De lo expuesto anteriormente surge un gran interés en el desarrollo de los siguientes puntos:

- Desarrollar morteros impermeabilizantes a base de filita para su uso en obra civil.
- Caracterización de las propiedades físico-químicas de los morteros.
- Comprobación de las aplicaciones como material impermeabilizante de los morteros desarrollados y optimización de su formulación.
- Estudio de la viabilidad económica del mortero para ver su posible explotación comercial.

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

## **2.1. LOCALIZACIÓN DE FILITAS**

La filita es un material muy abundante a nivel mundial pudiéndose encontrar en cualquier parte del mundo. Diferentes estudios geoquímicos localizan importantes yacimientos en EEUU (Abbott y Watts, 2010; Ciavarella y Wyld, 2008), África (Prakash, 2008), China (Zheng, et al., 2005) y en Grecia (Karakitsios y Rigakis, 2007).

En España, la localización de las filitas es extensa en todo su territorio, existiendo constancia de estudios stratigráficos de yacimientos de este material en la zona más septentrional de la península, como son los emplazamientos al Noroeste de Galicia (Novoa-Muñoz y García-Rodeja, 2007); en la parte meridional hay presencia de filitas en las provincias de Huesca y Lérida (García et al., 1996). Por último, en el Sureste de Andalucía y Extremadura (López, 2006).

La zona en la que nos encontramos y que es de nuestro interés, es la Cordillera Bética, en la que se pueden diferenciar tres tipos de paisajes distintos que presentan tres grados de deformación de sus rocas: Sierra Nevada, Filabres y el relieve de la costa malagueña. Estas zonas se dividen en tres bloques tectónicos superpuestos: El Complejo Nevado-Filábride, el Complejo Alpujárride y el Complejo Maláguide (Ruiz, 2006). El Complejo Alpujárride es el que más aflora de los tres siendo este el que centra nuestro interés, pudiendo llegar a verse en la zona de Cuevas del Almanzora (Almería). Otra zona en la que se pueden encontrar filitas es la zona de Sierra Alhamilla (Almería), en la que el color de esta puede variar entre el azul, violeta y rojizo fruto de la presencia de calizas y dolomías, todas ellas pertenecientes al Complejo Alpujárride (Hoinkes, et al., 2005).

Las filitas existentes en el Complejo Maláguide se localizan en yacimientos a 400 m de columna litológica en los Montes de Málaga (Cuevas, et al., 2001).

## **2.2. APLICACIONES DE LAS FILITAS**

Las filitas y otros materiales similares a ella, se viene usando desde la época romana por su abundancia y por la limitación de no poder transportar otros tipos de materiales de regiones más lejanas. Constan restos de tejas de filita en la base del pantano de Proserpina que suministraba agua a Emérita Augusta (Mérida), además de emplearse en la construcción de puentes y carreteras que atravesaban cauces fluviales y en la construcción de terma y baños públicos.

Otro uso histórico de las filitas es su empleo en las construcciones de “acequias de careo” (Fernández, et al., 2006), cuya finalidad es la de recargar de modo artificial los acuíferos existentes en Sierra Nevada recogiendo el agua del deshielo de las montañas para posteriormente infiltrar dicha agua en los estratos inferiores del suelo alargando así el ciclo hidrológico. Estas acequias fueron construidas durante el

dominio musulmán, hacia el año 1139. Las acequias de careo forman un sistema de distribución de aguas muy amplio por la zona de la Alpujarra que aún se conserva en funcionamiento para el riego de parcelas agrícolas tradicionales.

Simultáneamente con la acequias, se empezaron a emplear los materiales provenientes de las filitas en la construcción de tejados de viviendas en la zona de la Alpujarra por ser un material muy abundante en dicha zona. En las zonas con presencia de micaesquistos (pizarra) se emplean en la construcción de tejados de pizarra y en la fabricación de muros. Mientras tanto en las zonas con presencia de dolomías y filitas se emplea la tierra launa (filita triturada) para el recubrimiento de tejados para darles poder impermeabilizante (Suárez y Navarro, 2006).

Un uso mucho más moderno es su empleo como material de recubrimiento e impermeabilizante de cubiertas explanadas (Garzón, et al., 2005) y de balsas, como ha sido su uso en el vaso del Embalse de Benínar (Almería). En este aspecto Laird (1999) señaló que la naturaleza impermeabilizante de este material está relacionada con el agua que queda retenida en los filosilicatos, aumentando la superficie de hidratación, pero este efecto solo se produce en las capas más externas que están en contacto con el agua.

A pesar de la gran cantidad de aplicaciones que se le da a este tipo de material, hasta la fecha, los estudios realizados sobre el uso de las filitas como material impermeabilizante se limitan a una descripción basada en su apreciación física, resultado del amplio conocimiento extendido de su aplicación y de su bajo coste como material de explotación. Garzón et al. (2010) han llevado a cabo el estudio de las propiedades físicas y geotécnicas que es de interés a la hora de estudiar la preparación de un mortero impermeabilizante como el objeto de estudio del presente trabajo.

### **2.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MECÁNICAS**

**Definición de filita:** las rocas denominadas filitas son rocas foliadas, metamorfizadas bajo un metamorfismo regional de bajo grado de materiales pizarrosos arcillosos que presentan un cierto grado de esquistosidad. La abundancia de filosilicatos de grano fino imprime un tacto untuoso a estas filitas y las hacen partirse fácilmente en lajas delgadas, es decir, son exfoliables (Valera et. al., 2002) y (Sousa Santos, 1975).

A continuación vamos a exponer las peculiaridades y las características que poseen las filitas que le otorgan las propiedades impermeabilizantes.

Las características principales de las filitas son su peso específico relativamente bajo, con láminas de exfoliación que pueden ser flexibles e incluso elásticas. La estructura más común entre los filosilicatos que forman las filitas es la hoja de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  de extensión indefinida. Estos grupos tetraédricos se unen entre sí compartiendo entre 3-4 oxígenos con estructuras vecinas para formar las capas que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. El silicio tetraédrico puede ser sustituido a veces por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$  (Bennett y Hulbert, 1986).

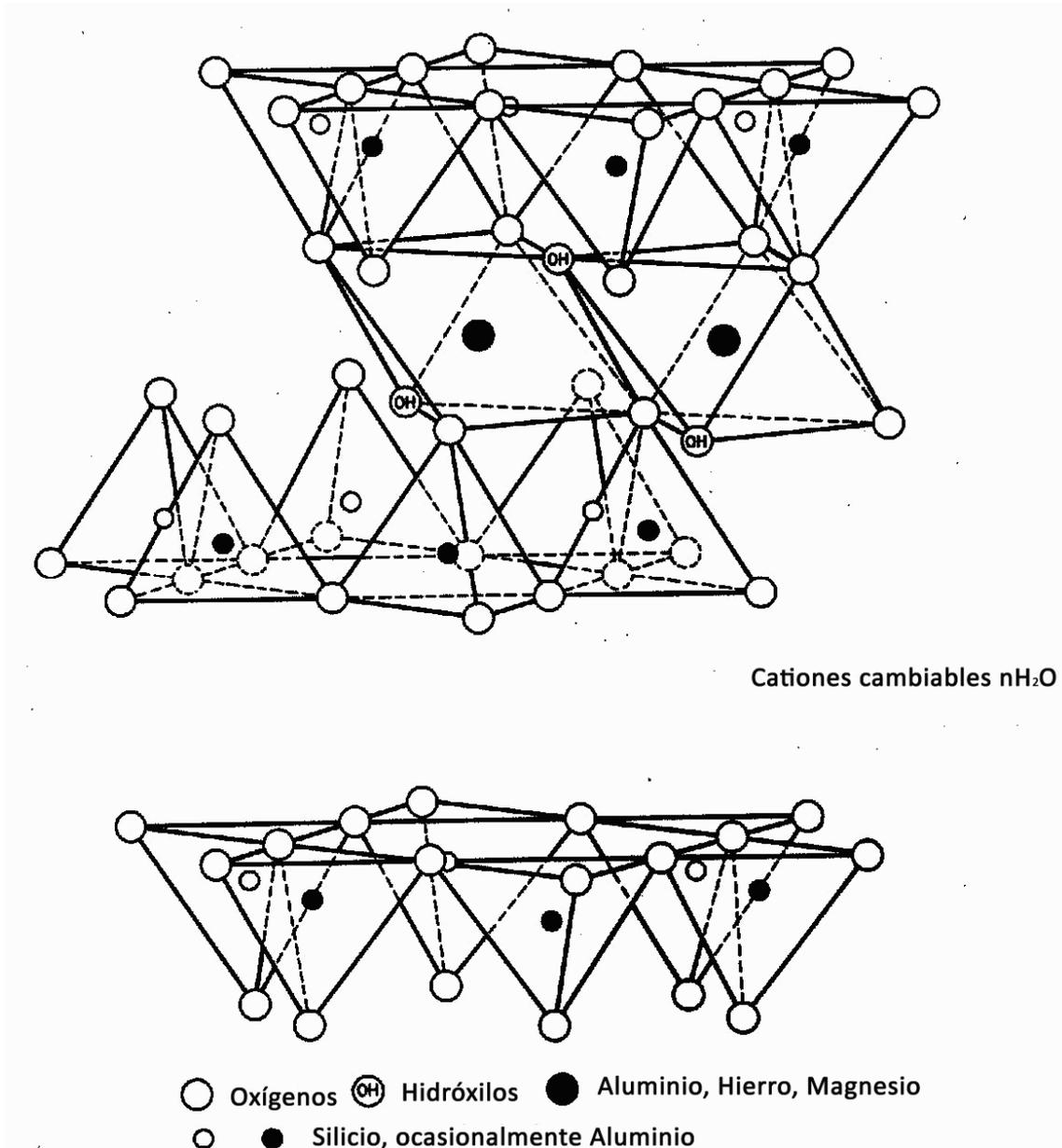


Figura 1. Esquema de las hojas de filosilicatos. En la parte inferior aparece una hoja tetraédrica elemental de filosilicato y en la parte superior aparece una hoja más compleja de filosilicato formada por dos capas elementales con una capa intermedia octaédrica.

Los estudios realizados por Garzón, et al. (2007) a una muestra de filita situada en la zona de la Alpujarra en el municipio de Berja (Almería), demuestra que se caracteriza por tener una composición química silicoaluminosa, en la que predomina el

contenido de sílice sobre el de alúmina. En la composición mineralógica predominan los silicatos laminares, existiendo un mineral interestratificado, la montmorillonita-clorita (Ruiz, 2001).

La microestructura del mineral, estudiada a través del microscopio electrónico, viene determinada por una morfología predominantemente laminar, con láminas dispersas de distinto tamaño y agrupaciones de espesores variables, de acuerdo con el contenido mayoritario de los filosilicatos (Garzón, et al., 2007). Estas características junto con la intrusión de la montmorillonita, convierte a los filosilicatos en un tipo de arcillas particulares denominadas expansivas.

En lo referente al comportamiento mecánico, las arcillas expansivas se caracterizan por tener bajas resistencias a sollicitaciones mecánicas y a la rotura, poca dureza, baja resistencia a la abrasión, rotura por impacto y son muy deformables. Este bajo rendimiento en lo referente al comportamiento mecánico es la razón de que nunca se hallan empleado como material en obras estructurales y que se consideren peligrosas cuando se presentan de forma natural ya que son causantes de deslizamientos de tierra de taludes y laderas que provocan la rotura de infraestructuras y obras civiles (López-Lara, 1995).

Otro comportamiento mecánico típico de las arcillas expansivas es el hinchamiento, que se produce por el aumento de la humedad del suelo, siendo los fenómenos más habituales los deslizamientos y los asentamientos diferenciales del terreno. La existencia de estos fenómenos en suelos de regiones áridas es muy común (Lamara, et al., 2005).

Según Barrera y Garnica (2002) los mecanismos microestructurales responsables de la expansión del suelo son tres y pueden actuar de forma aislada o de manera conjunta:

- **Hidratación de las partículas arcillosas:** las partículas de arcilla atraen, mediante cargas eléctricas, moléculas de agua. Estas moléculas de agua hidratan a la molécula de arcilla haciendo que esta aumente su volumen provocando la expansión.
- **Hidratación de cationes:** las moléculas de agua se pueden disponer alrededor de los cationes presentes entre las partículas provocando un aumento de volumen que provoca la expansión del suelo.
- **Repulsión osmótica:** se puede provocar una absorción de moléculas de agua por ósmosis cuando ponemos en contacto agua pura, consideramos agua de lluvia, con otro material rico en cationes como es el suelo rico en materia orgánica. Se producirá una migración de partículas hacia la zona

rica en cationes para igualar las concentraciones de cationes, con el consiguiente hinchamiento asociado.

Además barrera y Garnica aseguran que el comportamiento del suelo puede ser predicho si conocemos la naturaleza de las arcillas presentes en dicho suelo. Así, los suelos formados por montmorillonita tienen un comportamiento muy expansivo, mientras que los formados por illita y caolinita son menos expansivos.

## **2.4. MORTEROS**

### **2.4.1. GENERALIDADES**

Según Rivera (2011), los morteros hidráulicos se obtienen de la mezcla de varios componentes como son el cemento, agregados, agua y aditivos. Cada uno aporta una propiedad al mortero como son:

- **Cemento:** Es un material pulverizado formado por sílice, óxido de hierro y alúmina a cuyo conjunto se le denomina clinker. El cemento forma la matriz del mortero y es el componente que posee la capacidad de adherir a todos los demás componentes.
- **Agregados:** forman entre el 50-80% del volumen total del mortero. Son materiales inertes naturales o artificiales y son los que más influyen en las características finales del mortero, debido a que son los agregados los que aportan las propiedades mecánicas y químicas al conjunto del mortero. La filita de nuestro estudio se englobaría en este apartado.
- **Aditivos:** su función es la de mejorar las cualidades del mortero, existen infinidad de aditivos según propiedad que se quiera alterar del mortero.

### **2.4.2 MORTEROS IMPERMEABILIZANTES**

Los morteros impermeabilizantes son un tipo particular de morteros en los que no se busca que posean una gran resistencia mecánica ya que no se usan para construcciones estructurales, la utilidad de estos morteros es el de revestimiento de paredes para hacer a dichas paredes impermeables al paso de agua.

Los morteros impermeabilizantes se vienen obteniendo mediante la utilización de agregados de pequeño tamaño para disminuir el número y sobre todo el

tamaño de los poros y fundamentalmente por la adición de aditivos. Los aditivos que se suelen usar en caso de morteros impermeabilizantes son los siguientes:

- Jabones metálicos: estearatos, oleatos, lauratos, etc. Este tipo de aditivos poseen la propiedad de ser hidrófobos evitando que el agua se introduzca dentro del mortero.
- Sulfato de aluminio, carbonato sódico, oxalato sódico y coloides susceptibles de hincharse. Al entrar en contacto el agua con el mortero, se produce el hinchamiento repentino del mortero situado en la capa más externa provocando la obstrucción de los poros, evitando que el agua pueda pasar al interior de la masa del mortero.

Sobre este punto Alsina, 2006 desarrollo un mortero al que le incorporó unas armaduras en forma de pelos de fibra sintética y resina acrílica de base acuosa, consiguiendo una pasta maleable de alto poder adhesivo, que al secarse presenta gran flexibilidad y una alta capacidad de impermeabilización.

La utilización de aditivos siempre encarece el precio del mortero, esto hace necesario la obtención de un mortero impermeabilizante que no requiera de la utilización de aditivos específicos.

# CAPÍTULO 3. MATERIAL Y MÉTODOS

---

### **3.1. TAMIZADO Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

La composición del mortero desarrollado en este proyecto se basa en una mezcla de filita con cemento comercial del grupo Cemex, cuya designación es BL II B-LL 42,5R según UNE-EN 197-1:2000, compuesto por Clinker (65-79%), adiciones de caliza 21-35% y componentes minoritarios (0-5%). La razón de usar cemento con acabado en blanco es que al combinarse con las filitas, nos da el color de estas y se puede respetar la arquitectura tradicional de la Alpujarra.

La filita empleada en el mortero tiene un tamaño inferior a 200 Mm., ya que así se facilita la reacción con el cemento. La filita original que vamos a emplear en los ensayos, se encuentra en sacos de 15 kg en las instalaciones del CITE II-A de la Universidad de Almería. Este material debe ser triturado y posteriormente tamizado. La filita será triturada de manera manual. Para ello se verterá un saco de filita natural en un carro de mano y se machacará la filita con un martillo de forma manual hasta conseguir la mayor disgregación de las partículas posible.

Una vez triturada la filita, se hace pasar por el tamiz  $\varnothing 200$  y ese será el producto final que posteriormente se mezcla con el cemento comercial en distintas proporciones para su estudio.

### **3.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL MORTERO**

El objetivo de este primer ensayo es clasificar el mortero según su densidad basándonos en la siguiente clasificación:

Tabla 1. Clasificación de los morteros por densidad según Rivera, 2011.

<b>TIPO DE MORTEROS</b>	<b>DENSIDAD DEL MORTERO (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>EJEMPLO DE UTILIZACIÓN</b>
Ultraligero	500-950	Mortero para aislamiento
Ligero	1450-1950	Rellenos, mampostería y estructural
Normal	2250-2450	Uso estructural y no estructural
Pesado	3000-5600	Protección ante radiaciones gamma o X y en contrapesos

## MATERIALES

Para este ensayo se necesitarán los siguientes materiales:

- Filita tamizada.
- Cemento blanco antes mencionado.
- Una balanza de precisión.
- un molino de bolas.
- Embudo de cristal con su soporte metálico.
- Probeta de 159 centímetros cúbicos.

## PROCEDIMIENTO

Se prepararán muestras de 500 gramos de peso cada una, variando el porcentaje de sus componentes. Se empieza determinando la densidad de conjunto de una muestra con el 100% en peso de cemento blanco y el 0% de filita para posteriormente ir variando las proporciones de los componentes en un 10% hasta llegar a una muestra con el 100% de filita y el 0% de cemento.

En total se prepara 11 muestras (9 de ellas son mezclas) con los siguientes porcentajes en peso:

Tabla 2. Composición de los mortero que van a ser estudiados.

Nº muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Filita (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Cemento (%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0

Empezaremos mezclando el cemento y la filita de manera homogénea. Para ello se utilizará un molino de bolas pero sin usar las bolas y se dejará que se mezclen durante 10 minutos.

Posteriormente se colocará la probeta debajo del embudo y se pasará parte de la muestra ya mezclada a través del embudo hasta llenar la probeta (Fig.2). Una vez llena se enrasa y se pesa (Fig. 3 y 4).



Figura 2. Llenado de la probeta.



Figura 3. Enrasado de la probeta.



Figura 4. Pesaje de la probeta una vez llena.

Conocidos el volumen y el peso, se determinará la densidad de conjunto de la muestra mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Finalmente se seleccionarán las tres mezclas que habiendo dado un valor de densidad comprendida entre (0,50-1,00) g/cm<sup>3</sup> correspondiente a los morteros ultraligeros, contengan mayor porcentaje de filitas.

### **3.3. RETENCIÓN DE AGUA DEL MORTERO**

La finalidad de este ensayo es la de determinar la capacidad del mortero para retener el agua durante el fraguado. Este factor es muy importante ya que cuanto mayor tiempo esté el agua retenida en la mezcla se dispondrá de más tiempo para moldear y aplicar el mortero.

#### **MATERIALES**

En este ensayo usaremos los siguientes materiales:

- 2000 gramos de cada tipo de mortero seleccionado.
- Un embudo metálico.
- Un tamiz metálico.
- Papel de filtro.
- Un matraz kitasato.
- Una bomba de vacío.
- Una balanza.
- Retenedor de agua (culminal).
- Un molino de bolas.

## PROCEDIMIENTO

Para este ensayo usaremos las tres mezclas que hayan sido seleccionadas en el ensayo de densidad.

- 1) Se prepararán muestras de 2000 gramos para cada tipo de mezcla.
- 2) Se homogeniza en el molino de bolas durante 5 minutos y posteriormente se divide en 4 submuestras de 500 gramos.
- 3) A la submuestra se le añade el 40% en peso de agua (200 gr).
- 4) En el embudo con la criba se coloca el papel de filtro mojado y se pesa obteniendo (P0) como se indica en la figura 5.

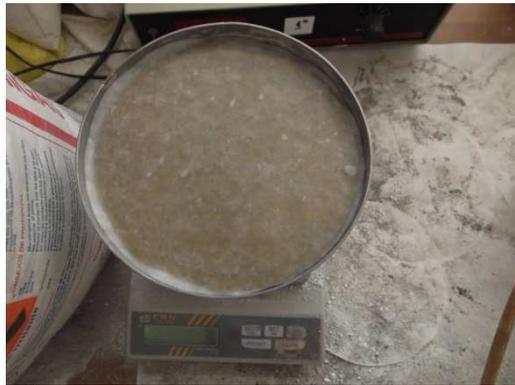


Figura 5. Embudo con su criba y el papel de filtro ya humedo sobre la balanza.

- 5) Se amasa la submuestra mezclando en un cubo los 500 gramos de material solido con los 200 gramos de agua.
- 6) Se rellena el embudo con la masa fresca de mortero, se enrasa y se vuelve a pesar obteniendo (P1).
- 7) Todo el sistema se coloca sobre el matraz kitasato y se conecta a la bomba de vacío durante 5 minutos. Pasado ese tiempo se vuelve a pesar para obtener el peso del mortero fresco ya escurrido que será el (P2).
- 8) A la siguiente submuestra se le añade un 0,01% de Culminal (retenedor de agua) que equivale a 0,05 gramos.
- 9) Se le añade la misma agua y se hace la misma operación que con la primera submuestra.
- 10) A la tercera submuestra la proporción de Culminal será del 0,05% que equivale a 0,25 gramos.
- 11) A la cuarta submuestra se le añade el 0,07% de Culminal que equivale a 0,35 gramos.

Una vez obtenidos los tres pesos de las distintas muestras se realizarán los siguientes cálculos para poder determinar el porcentaje de agua retenida:

- 1) Se calcula la masa de agua total del mortero que será:

$$\text{Magua} = (P1 - P0) \times 0,40$$

- 2) Se determina la cantidad de agua que se ha perdido retenida del mortero que será:

$$\text{Magua perdida} = P1 - P2$$

- 3) Posteriormente se obtendrá la cantidad de agua retenida en el mortero mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Magua retenida} = \text{Magua} - \text{Magua perdida}$$

- 4) Finalmente el porcentaje de agua retenida se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ agua retenida} = \text{Magua retenida} / \text{Magua}$$

### **3.4. CONSISTENCIA DEL MORTERO**

La razón de realizar el ensayo de consistencia es para determinar la adherencia interna del mortero que es fundamental a la hora de aplicar morteros en superficies verticales y en techos. De no tener una buena consistencia el mortero se desprendería de las paredes durante su aplicación y sería inviable su uso.

Debemos tener en cuenta que la consistencia se determina midiendo el escurrimiento de la muestra pues la consistencia no es una propiedad que se pueda medir directamente. El uso práctico del valor escurrimiento es el de llevar el mortero fresco a un nivel de consistencia en el que su trabajabilidad se pueda medir y evaluar.

#### **MATERIALES**

- 2000 gramos de cada tipo de mortero seleccionado en el ensayo de densidad.
- Éter de almidón y ST-G.
- Mesa de sacudidas con ejes graduados.
- Molde correspondiente a la mesa de sacudidas.

## **PROCEDIMIENTO**

En este ensayo se estudiarán las mismas tres mezclas que se seleccionaron en el ensayo de densidad. Para cada mezcla se prepararán 2000 gramos, que se dividirán en dos muestras de 1000 gramos cada una. Una se ensaya sin añadir ningún tipo de aditivo, mientras que a la segunda muestra se le añadirá un 0,005% de éter de almidón (ST-G). El volumen de agua de amasado será del 40% que equivale a 400 gramos para cada muestra.

El procedimiento a seguir en este ensayo será el establecido en la norma UNE 83811: 1992 EX.

### **3.5. RESISTENCIA MECÁNICA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN**

La propiedad más importante de un mortero es su resistencia tanto a flexión como a compresión, ya que durante su vida útil, el mortero se verá sometido a este tipo de esfuerzos constantemente.

#### **MATERIALES**

Para este ensayo vamos a emplear los siguientes materiales:

- 2000 gramos de cada tipo de mortero.
- 6 moldes de tres compartimentos de (4 x 4 x 16) cm.
- Éter de almidón y ST-G.
- Prensa hidráulica para rotura a compresión y flexión.

#### **PROCEDIMIENTO**

Para este ensayo se van a utilizar las mismas mezclas que el ensayo de consistencia de mortero, incluidas las dos muestras una con aditivos y la otra sin aditivo.

El procedimiento a seguir será el que establece la norma UNE-EN 1015-11: 2000/ A1: 2007.

### **3.6. ANÁLISIS DEL MORTERO MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (MEB)**

Con este ensayo se realizará un análisis visual de la distribución de las partículas de cemento frente a las de filita mediante la toma de imágenes con grandes aumentos y alta resolución. Además, este equipo permite realizar un análisis químico de zonas concretas de la muestra para establecer su composición, esta opción no será utilizada.

#### **MATERIALES**

- Mortero endurecido procedente del ensayo de resistencia a flexión y a compresión.
- Microscopio electrónico de barrido.

#### **PROCEDIMIENTO**

Para este análisis, las muestras de estudio se obtendrán de los restos de superficies de fractura obtenidos en el ensayo de rotura a flexión y a compresión.

Las muestras serán de un tamaño no superior al de un prisma de dimensiones (2x3x5) mm. Dicha muestra se fijará a un portaobjetos de carbono donde deberá quedar en reposo al menos 30 minutos antes de introducirla en el microscopio electrónico.

Este ensayo se realizará en el edificio de servicios técnicos de la Universidad de Almería que están dotados de un microscopio electrónico de barrido HITACHI modelo S-3500N (fig.6).



Figura 6. MEB HITACHI S-3500N igual al que se encuentra en la UAL.

### **3.7. MÉTODO DE ADSORCIÓN DE GAS NITRÓGENO**

Este ensayo es el más importante ya que nos permite determinar la propiedad más importante en nuestro estudio que es la permeabilidad de nuestros morteros.

#### **MATERIALES**

- Mortero endurecido procedente del ensayo de resistencia a flexión y a compresión.

#### **PROCEDIMIENTO**

La determinación de la permeabilidad se ha obtenido siguiendo la metodología descrita por Garzón et al., 2012b.

Mediante esta metodología se puede determinar la superficie específica y la estructura de los poros a través de la adsorción de gas nitrógeno a la temperatura del nitrógeno líquido (-180°C). La determinación de la superficie específica se ha estimado a través del método de Brunauer, Emmett y Teller (BET) y el método de Langmuir. La distribución del tamaño de poro y el volumen total de poros de la muestra fue evaluada a través del método Barret, Joyner, Halenda (BJH).

Comparando los datos de distribución de tamaño de poro de la muestra natural en la fase de desorción con los datos de intrusión del gas es como se determina la permeabilidad de la muestra.

Para la realización de este ensayo se requiere de un equipo tecnológico muy específico que no se encuentran en la Universidad de Almería y de experiencia para trabajar con los datos. Por ello se dispone de la colaboración de los servicios técnicos del Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla al cual se le enviarán las muestras y serán ellos quienes obtengan los resultados finales de permeabilidad para cada muestra.

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

#### **4.1. TAMIZADO Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

En el proceso de trituración y tamizado de la filita natural se utilizaron varios lotes provenientes de diferentes yacimientos que se encontraban almacenados en las naves de ingeniería rural. Estos lotes, a pesar de formar parte del complejo Alpujárride, poseen pequeñas diferencias como se puede observar al tener cada lote de filita una tonalidad diferente (fig.7 y fig.8). Estas diferencias pueden asociarse a distinto tamaño de partículas, variaciones en el contenido de fases minerales que constituyen las filitas y a su composición química silico-aluminosa en la que elementos químicos como son el hierro y titanio (expresados en óxidos  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ) son el origen de variaciones en las componentes cromáticas de esta materia prima y por tanto, en su tonalidad siempre y cuando no se presenten altos contenidos de materia orgánica (Garzón et al. 2007, 2009, 2012a).



Figura 7. Recipiente con filita ya triturada en la que se aprecian tres tonalidades distintas.



Figura 8. Mismo recipiente con dos lotes diferentes y sus respectivas tonalidades.

La falta de homogeneidad de los productos de origen natural, puede dificultar la comparación de las propiedades mecánicas de distintas muestras de ensayo.

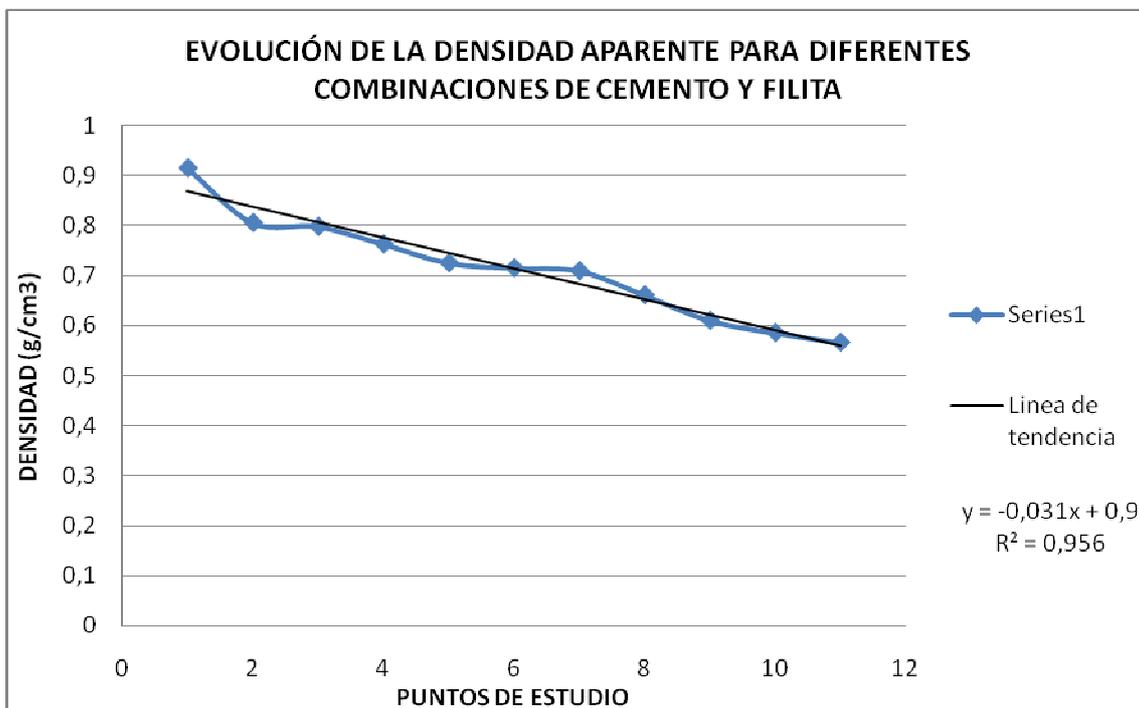
#### **4.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD**

Los resultados del ensayo de la densidad del mortero seco determinan todos los morteros entran dentro de la clasificación de morteros ultraligeros al estar todas las densidades en el intervalo comprendido entre los (0,5-1,0) g/cc, también que la filita posee una menor densidad que el cemento blanco (Tabla 3).

La densidad de los puntos intermedios estudiados cambia de manera muy progresiva respecto a los puntos extremos de la tabla, no existiendo cambios significativos (Grafico).

Tabla 3. Resultados de las densidades del conjunto de los morteros con diferentes proporciones de cemento y filita.

Nº MUESTRA	CEMENTO (g)	CEMENTO (%)	FILITA (g)	FILITA (%)	PESO (g)	DENSIDAD (g/cc)
1	500	100	0	0	145,5	0,92
2	450	90	50	10	128,1	0,81
3	400	80	100	20	126,9	0,80
4	350	70	150	30	121,3	0,76
5	300	60	200	40	115,3	0,73
6	250	50	250	50	113,7	0,72
7	200	40	300	60	112,8	0,71
8	150	30	350	70	105,1	0,66
9	100	20	400	80	97	0,61
10	50	10	450	90	93,1	0,59
11	0	0	500	100	90	0,57



Se puede observar que la densidad del conjunto de los morteros obtenidos disminuye progresivamente a medida que aumenta el contenido de filitas pasando de

0.91 g/cc con 100% de cemento a 0.56 g/cc con 100% de filita, siendo de 0.71 g/cc si el porcentaje de ambos componentes es del 50%. En la gráfica podemos apreciar que la sucesión de los puntos se ajusta a una recta de primer grado, con un coeficiente de regresión  $R^2 = 0.9567$ , tan solo dos puntos se desvían ligeramente de la línea de tendencia. Pero los valores de esos puntos no deben considerarse como definitivos debido a que el procedimiento para realizar el ensayo es bastante impreciso a la hora de conseguir una compactación homogénea en todas las muestras de estudio. Aún así, en una primera aproximación y con valores medios, los resultados obtenidos son de aplicación.

Finalmente vamos a escoger los 3 morteros que siendo ultraligeros poseen el mayor porcentaje de filita, estos morteros son los correspondientes a los puntos 8,9 y 10. Se han seleccionado los morteros con menor porcentaje de cemento por ser más económico, ya que los productos de origen natural siempre son más económicos que los productos de transformación industrial, como es el cemento. También hay que tener en cuenta que quien proporciona las propiedades impermeabilizantes es la filita, por tanto es otra razón evidente por la que se eligen los morteros con mayor porcentaje de filita.

#### **4.3. RETENCIÓN DE AGUA DEL MORTERO**

Para la realización de este ensayo se seleccionaron los siguientes morteros:

**Tabla 4. Puntos seleccionados del ensayo de densidades de conjunto en los que aparecen el % de sus componentes.**

<b>Nº Muestra</b>	<b>Cemento (%)</b>	<b>Filita (%)</b>
8	30	70
9	20	80
10	10	90

Antes de la realización de este ensayo las expectativas son que a mayor porcentaje de filita y de retenedor de agua (culminal), el porcentaje de agua retenida fuese mayor.

A continuación se muestran los resultados del ensayo en tres tablas distintas correspondientes cada una a un mortero determinado. En cada tabla se observan cuatro resultados correspondientes a las cuatro submuestras que se han realizado conteniendo distintas proporciones de aditivo.

**Tabla 5. Resultados de retención de agua para la muestra con el 90% de filita y el 10% de cemento.**

Submuestra 1: sin aditivos.		Submuestra 2: con 0,01% culminal		Submuestra 3: con 0,05% culminal		Submuestra 4: con 0,07% culminal	
P0=	791,0	P0=	793,4	P0=	793,4	P0=	794,5
P1=	1220,1	P1=	1268,0	P1=	1241,6	P1=	1192,1
P2=	1216,0	P2=	1265,0	P2=	1240,9	P2=	1191,5
M. agua=	77,238	M. agua=	85,428	M. agua=	80,676	M. agua=	71,568
M. agua perdida=	4,1	M. agua perdida=	3,0	M. agua perdida=	0,7	M. agua perdida=	0,6
M. agua retenida=	73,1	M. agua retenida=	82,4	M. agua retenida=	79,976	M. agua retenida=	70,968
%R=	94,69	%R=	96,49	%R=	99,13	%R=	99,16

En esta muestra con el 90% de filita el comportamiento ha sido el esperado, reteniendo más agua cuanto mayor proporción de aditivo retenedor poseía mejorando así la trabajabilidad, esto hace recomendable el empleo de retenedor de agua pero es importante apreciar que la diferencia de agua retenida entre la submuestra 3 y la submuestra 4 es despreciable siendo innecesario el empleo de grandes cantidades de aditivo retenedor.

**Tabla 6. Resultados de retención de agua para el mortero preparado con el 80% de filita y el 20% de cemento.**

Submuestra 1: sin aditivos.		Submuestra 2: con 0,01% culminal		Submuestra 3: con 0,05% culminal		Submuestra 4: con 0,07% culminal	
P0=	793,6	P0=	790,5	P0=	792,9	P0=	792,1
P1=	1167,2	P1=	1176,2	P1=	1204,3	P1=	1204,7
P2=	1143,7	P2=	1157,1	P2=	1180,9	P2=	1183,5
M. agua=	149,44	M. agua=	154,28	M. agua=	164,56	M. agua=	165,04
M. agua perdida=	23,5	M. agua perdida=	19,1	M. agua perdida=	23,4	M. agua perdida=	21,2
M. agua retenida=	125,9	M. agua retenida=	135,2	M. agua retenida=	141,16	M. agua retenida=	143,84
%R=	84,27	%R=	87,62	%R=	85,78	%R=	87,15

La muestra con el 80% de filita ha retenido un menor porcentaje de agua respecto a la muestra con el 90% de filita lo que confirma el comportamiento retenedor de la filita. También tenemos una anomalía en los resultados ya que la submuestra 3 que tiene mayor proporción de retenedor de agua que la submuestra 2 ha retenido una menor cantidad relativa de agua. También podemos apreciar que la incorporación de grandes porcentajes de aditivo no implica un mejor comportamiento del mortero a la hora de retener agua, ya que los resultados de la submuestra 2 y 4 son casi idénticos. En este caso también sería recomendable el empleo de la cantidad mínima de retenedor pues mejora notablemente la trabajabilidad del mortero.

**Tabla 7. Resultados de retención de agua para el mortero preparado con el 70% de filita y el 30% de cemento.**

Submuestra 1: sin aditivos.		Submuestra 2: con 0,01% culminal		Submuestra 3: con 0,05% culminal		Submuestra 4: con 0,07% culminal	
P0=	789,3	P0=	793,1	P0=	792,7	P0=	793,3
P1=	1179,7	P1=	1199,6	P1=	1203,9	P1=	1224,6
P2=	1166,7	P2=	1178,5	P2=	1187,3	P2=	1202,6
M. agua=	156,16	M. agua=	162,6	M. agua=	164,48	M. agua=	172,52
M. agua perdida=	13,0	M. agua perdida=	21,1	M. agua perdida=	16,6	M. agua perdida=	22
M. agua retenida=	143,2	M. agua retenida=	141,5	M. agua retenida=	147,88	M. agua retenida=	150,52
%R=	91,68	%R=	87,02	%R=	89,91	%R=	87,25

La muestra con el 70% de filita ha tenido un comportamiento fuera de lo esperado, ya que al aplicar aditivo retenedor de agua ha disminuido su capacidad de retener agua, observándose su máxima capacidad retenedora en la submuestra sin aditivos. Además, ha retenido un porcentaje de agua ligeramente superior que la muestra con el 80% de filita lo cual no era tampoco de esperar.

La falta de efectividad con altos porcentajes se debe a que las filitas contienen filiosilicatos y minerales de la arcilla, que reaccionan con el aditivo orgánico (hidroxipropil celulosa = culminal) a un % crítico se forma un producto, que es inactivo para retener agua.

#### **4.4. CONSISTENCIA DEL MORTERO**

Los resultados de consistencia del mortero se han obtenido siguiendo las referencias de la norma UNE 83811: 1992 EX con mesa de sacudidas.

A continuación se muestran los resultados de las tres muestras bajo estudio que son las mismas que las consideradas en el ensayo de retención de agua. Los resultados para cada muestra se presentan en una tabla independiente dividida en dos apartados correspondientes a dos submuestras, una sin aditivos y otra con aditivos (éter de almidón y ST-G). Recordar que los resultados corresponden al escurrimiento y que la consistencia es una propiedad que se deduce de dicho escurrimiento.

Resultados de la muestra con el 90% de filita y 10% de cemento.

**Tabla 8. Resultados de consistencia de mortero para una muestra con el 90% de filita y el 10% de cemento.**

Submuestra 1: sin aditivos		Submuestra 2: con aditivo (0,05gr de ST-G y éter de almidón).	
eje1=	63	eje1=	64
eje2=	64	eje2=	66
eje3=	68	eje3=	66
eje4=	63	eje4=	65
eje5=	60	eje5=	67
eje6=	58	eje6=	60
eje7=	59	eje7=	60
eje8=	60	eje8=	61
media=	61,875	media=	63,625
Escurecimiento total=	123,75	Escurecimiento total=	127,25

La muestra de mortero con el 90% de filita ha tenido un comportamiento anómalo al aumentar su escurrimiento en la muestra con aditivos respecto con la muestra sin aditivos y eso es algo que carece de sentido aunque se trata de un hecho experimental debidamente contrastado. La explicación de este suceso se encuentra en la incorrecta introducción de la pasta de mortero en el molde que provoca la presencia de fallas internas en dicho mortero.

Resultados de la muestra con el 80% de filita y el 20% de cemento.

**Tabla 9. Resultados de consistencia de mortero para una muestra con el 80% de filita y el 20% cemento.**

Muestra 1: sin aditivos		Muestra 2: con aditivo (0,05gr de ST-G y éter de almidón).	
eje1=	55	eje1=	55
eje2=	58	eje2=	63
eje3=	64	eje3=	64
eje4=	69	eje4=	65
eje5=	68	eje5=	60
eje6=	67	eje6=	54
eje7=	65	eje7=	50
eje8=	55	eje8=	52
media=	62,625	media=	57,875
Escurecimiento total=	125,25	Escurecimiento total=	115,75

La submuestra con el 80% de filita si presenta el comportamiento esperado pues la submuestra con aditivos presente un valor de consistencia un 7,5% superior a la muestra sin aditivos. Además mejora los resultados con respecto al mortero con el 90% de filita en un 10% siendo una mejora muy importante.

Resultados de la muestra con el 70% de filita y el 30% de cemento.

**Tabla 10. Resultados de consistencia de mortero para una muestra con el 70% de filita y el 30% cemento.**

Muestra 1: sin aditivos		Muestra 2: con aditivo (0,05gr de ST-G y éter de almidón).	
eje1=	67	eje1=	54
eje2=	65	eje2=	60
eje3=	63	eje3=	67
eje4=	61	eje4=	67
eje5=	61	eje5=	67
eje6=	64	eje6=	60
eje7=	64	eje7=	55
eje8=	64	eje8=	52
media=	63,625	media=	60,25
Escurrimiento total=	127,25	Escurrimiento total=	120,5

Por último, la submuestra con el 70% de filita ha vuelto a continuado con la tendencia esperada de mejorar su consistencia con la aplicación de aditivos, en este caso la mejora ha sido del 5,5% lo que confirma que la filita posee una consistencia muy baja siendo el cemento quien otorga esa propiedad al mortero. Respecto a la muestra con el 80% de filita habido una pérdida del 1,5% que no es significativo.

#### **4.5. RESISTENCIA MECÁNICA A FLEXIÓN Y A COMPRESIÓN**

Para este ensayo se han vuelto a usar las mismas proporciones que en todos los ensayos anteriores. El procedimiento a seguir es el especificado en la norma UNE-EN 1015-11: 2000/ A1:2007.

Se realizaron seis probetas para cada tipo de muestra, tres con aditivos y las tres restantes sin aditivos. Los aditivos usados son éter de almidón y ST-G ya

empleados en el ensayo de consistencia de mortero. De cada tres probetas una se somete a ensayo a los siete días y las dos restantes a los veintiocho días.

Las probetas permanecerán todo el tiempo de fraguado en la cámara húmeda de que dispone el departamento de ingeniería rural en las naves del CITE II-A. Durante los siete primeros días permanecerán en el molde y los días restantes hasta completar los veintiocho días estarán desmoldadas. La cámara permanecerá a una temperatura de unos  $(26 \pm 2)$  °C y a una humedad relativa del  $(95 \pm 5)$  %.

Los resultados se mostrarán en dos apartados, uno para los resultados de resistencia a flexión y otro para los resultados de resistencia a compresión. En cada apartado aparecerán dos tablas de resultados, una para los resultados a los 7 días y otra tabla relacionada con los resultados a los 28 días.

### **Resultados de resistencia a flexión**

Resultados a los 7 días.

Tabla 11. Resultados del ensayo de flexión de todas las muestras pasados 7 días.

Tipo de Mortero		Carga (N)	Resultados (N/mm <sup>2</sup> )
<b>90% filita 10% cemento</b>	Sin aditivo	2205,23	6,41
	Con aditivo	2205,23	6,41
<b>80% filita 20% cemento</b>	Sin aditivo	3185,33	9,26
	Con aditivo	2940,30	8,55
<b>70% filita 30% cemento</b>	Sin aditivo	5635,58	16,38
	Con aditivo	5635,38	16,38

Podemos apreciar como la resistencia a flexión está directamente relacionada con la proporción de cemento pues con un incremento del 20% en cemento la resistencia a flexión aumenta un 255%. Otra apreciación al comparar las submuestras con aditivo con respecto a las que no lo poseen es que no actúan dichos aditivos pasados los 7 primeros días de fraguado.

Resultados a los 28 días.

Tabla 12. Resultados de resistencia a flexión de todos los morteros pasados 28 días de fraguado.

Tipo de mortero	90% filita y 10% cemento		80% filita y 20% cemento		70% filita y 30% cemento	
	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo
<b>Cargas (N)</b>	2940,30	2450,25	3675,38	4410,45	5880,60	8330,85
	2695,28	1960,20	3920,40	4410,45	6370,65	6125,63
<b>Media (N)</b>	2817,79	2205,23	3797,89	4410,45	6125,63	7228,24
<b>Resultados (N/mm<sup>2</sup>)</b>	8,19	6,41	11,04	12,82	17,80	21,01

Pasados los 28 días de fraguado la resistencia de los morteros se ha incrementado un 27% respecto a las probetas analizadas a los 7 días, sin embargo el mortero con el 90% de filita no ha mejorado su resistencia y no solo eso sino que la muestra con aditivo presenta menos resistencia. Esta anomalía se asocia a que las probetas no han sido realizadas con gran destreza por el operario, ya que la mayoría de las probetas presentaban grietas superficiales originadas por la incorrecta compactación del mortero en los moldes y este hecho mermaban la resistencia de dichas probetas.

## Resultados de resistencia a compresión

Resultados a los 7 días.

Tabla 13. Resultados de resistencia a compresión de todos los morteros pasados 7 días de fraguado.

Tipo de mortero	90% filita y 10% cemento		80% filita y 20% cemento		70% filita y 30% cemento	
	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo
<b>Cargas (N)</b>	6583,73	6615,68	15210,68	20092,05	39502,35	37733,85
	6129,68	9555,98	17026,88	18866,93	36778,05	38713,95
<b>Media (N)</b>	6356,70	8085,83	16118,78	19479,49	38140,20	38223,90
<b>Resultados (N/mm<sup>2</sup>)</b>	3,973	5,05	10,07	12,17	23,84	23,89

Como resultado de este ensayo se puede apreciar la importancia que tiene la presencia del cemento, pues para incrementos del 10% de este elemento la resistencia se duplica, haciendo que el mortero 70/30 sea el más resistente en comparación con los otros. Mientras tanto la presencia de aditivos no modifica significativamente la resistencia a compresión.

Resultados a los 28 días.

Tabla 14. Resultados de resistencia a compresión de los morteros pasados 28 días de fraguado.

Tipo de mortero	90% filita y 10% cemento		80% filita y 20% cemento		70% filita y 30% cemento	
	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo
<b>Cargas (N)</b>	9310,95	12496,28	27687,83	29648,03	73507,50	69097,05
	10046,03	11271,15	17151,75	26217,68	69342,08	63461,48
	9801,00	11761,20	25482,60	34793,55	47289,83	48514,95
	10046,03	14946,53	28667,93	23522,40	60766,20	56845,80
<b>Media (N)</b>	9801,00	12618,79	24747,53	28545,41	62726,40	59479,82
<b>Resultados (N/mm<sup>2</sup>)</b>	6,13	7,89	15,47	17,84	39,20	37,17

Nuevamente y al igual que sucedía pasados 7 días de fraguado, las resistencias a compresión se duplican con incrementos del 10% de cemento en la composición del mortero. Eso hace que el mortero de composición 70/30 sea el que mejor comportamiento mecánico tiene en comparación con las otras dos composiciones de morteros. También ha sido el mortero con mayor cantidad de cemento el que más ha variado su resistencia respecto a la resistencia mostrada a los 7 días haciéndolo en un 77%.

#### **4.6. ANÁLISIS DEL MORTERO MEDIANTE MEB**

Con motivo de las anomalías presentadas en el ensayo de resistencia mecánica a flexión y a compresión, se ha realizado un estudio con microscopía electrónica de barrido para realizar un análisis (visual) en busca de imperfecciones que den explicación a las diferencias de resistencia en probetas que pertenecían a una misma muestra.



**Figura. 9. Imagen del MEB ampliada x35 (probeta 10% cemento y 90%filita).**

En la Fig. 9 podemos observar el interior de una probeta (superficies de fractura) con el 10% de cemento y el 90% de filita y se puede apreciar la presencia de heterogeneidades debidas a burbujas de aire, además de pequeños orificios pertenecientes a poros de tipo “capilar” que se encuentran en el interior del mortero. También puede observarse que la mezcla entre cemento y filita no es homogénea a este nivel, ya que, se encuentran los grumos de cemento.

Las imperfecciones presentadas en la muestra anterior se repiten en la siguiente muestra (fig. 10) perteneciente a la mezcla del 70% de filita con el 30% de cemento. Pero esa mayor cantidad de cemento no se aprecia en la imagen, lo que

sugiere que el cemento no se reparte de manera homogénea por la probeta, provocando la presencia de zonas más débiles en dicha probeta que es por donde se fracturaría de manera prematura.

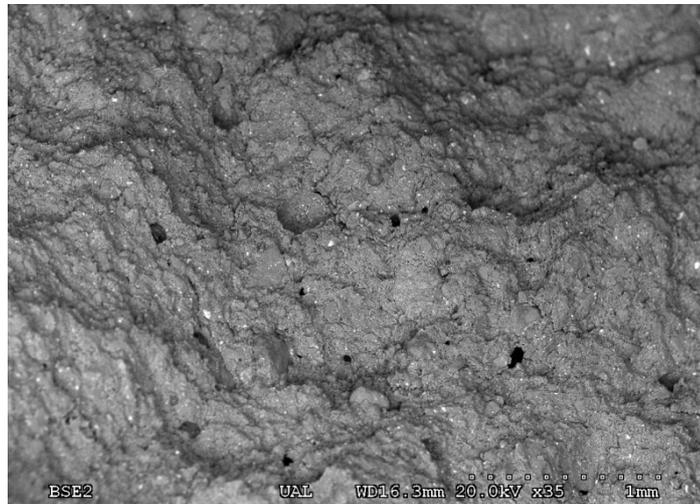


Figura. 10. Imagen del MEB ampliada x35 (probeta 30% cemento y 70% filita).

De ahí que los resultados de resistencia a compresión que se han observado a los 7 y 28 días de fraguado, hayan presentado gran dispersión.

#### 4.7. ENSAYO DE ADSORCIÓN DE GAS NITRÓGENO

A diferencia de los demás ensayos, este ensayo no ha sido realizado en la Universidad de Almería como se indicó en el capítulo anterior. Los coeficientes de permeabilidad obtenidos siguiendo lo indicado por Garzón et al., 2012b, para cada muestra se compararán con la tabla de clasificación de grados de permeabilidad (tabla 15) de Terzaghi y Peck (Lambe, 2001).

Tabla 15. Clasificación de los suelos según sus coeficientes de permeabilidad.

Grado de permeabilidad	Valor de $k$ (m/s)
Elevada	Superior a $10^{-3}$
Media	$10^{-3} - 10^{-5}$
Baja	$10^{-5} - 10^{-7}$
Muy baja	$10^{-7} - 10^{-9}$
Prácticamente impermeable	Menor de $10^{-9}$

A continuación se presenta los valores de permeabilidad proporcionados por el Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla para cada muestra y su grado de permeabilidad de acuerdo con dicha clasificación presente en la tabla 15.

**Tabla 16. Resultados de todas las muestras de estudio sometidas al ensayo de permeabilidad.**

Muestra	Permeabilidad (m/s)	Grado de permeabilidad
90% filita y 10% cemento sin aditivos	$6,5101 \cdot 10^{-14}$	Prácticamente impermeable
90% filita y 10% cemento con aditivos	$5,99593 \cdot 10^{-15}$	Prácticamente impermeable
80% filita y 20% cemento sin aditivos	$8,50987 \cdot 10^{-14}$	Prácticamente impermeable
80% filita y 20% cemento con aditivos	$9,58792 \cdot 10^{-14}$	Prácticamente impermeable
70% filita y 30% cemento sin aditivos	$9,42473 \cdot 10^{-14}$	Prácticamente impermeable
70% filita y 30% cemento con aditivos	$1,03869 \cdot 10^{-13}$	Prácticamente impermeable

Como era de esperar cuanto más contenido en filita tenga el mortero más impermeable es, mientras que la diferencia de tener o no aditivos es prácticamente despreciable. Y todos se pueden considerar como completamente impermeables.

#### **4.7. VIABILIDAD ECONÓMICA**

Se ha realizado un estudio de viabilidad económica en la preparación de estos morteros sobre la base de estimaciones de coste actual.

Los precios de aditivos y de cemento que se presenta (Tabla 17) a continuación han sido facilitados por el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería mientras que el precio de la filita ha sido facilitado por Canteras GOVI S.L., empresa de áridos y transporte de mercancías.

**Tabla 17. Precios individuales de los componentes presentes en los morteros estudiados.**

MATERIAL	PRECIO (€/kg)
FILITA	0,01514
CEMENTO	0,01214
ST-G	2,1
CULMINAL	7,3
ÉTER DE ALMIDÓN	7,55

Los precios de la filita y del cemento son similares por lo que conseguiremos un mortero con propiedades impermeabilizantes al mismo precio que un mortero sin dicha propiedad.

En la Tabla 18 se presenta los precios por kilogramo de los morteros estudiados, teniendo en cuenta las proporciones de cada elemento y los precios unitarios de cada producto.

**Tabla 18. Precios orientativos de kilogramo de mortero.**

<b>Muestra</b>	<b>Precio (€/kg)</b>
90% filita y 10% cemento sin aditivos	0,01484
90% filita y 10% cemento con aditivos	0,08836
80% filita y 20% cemento sin aditivos	0,01454
80% filita y 20% cemento con aditivos	0,08803
70% filita y 30% cemento sin aditivos	0,01424
70% filita y 30% cemento con aditivos	0,08770

Por tanto, según estos resultados y como era previsible, los morteros con aditivos son un 16% más caros que los morteros sin aditivos. Sin embargo, el valor añadido de ser morteros impermeabilizantes, como se ha demostrado en el presente estudio, es la cualidad más interesante e importante que se puede resaltar como resultado final de la experiencia llevada a cabo y se ha conseguido sin la adición de aditivos específicos para la impermeabilización lo que hace que los morteros no se encarezcan aun más.

# CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

---

## 5.1. CONCLUSIONES

Se han preparado distintos morteros en los que se han empleado contenidos variables de filita y un cemento comercial hasta llegar a un 90% de filita en peso. Tras el estudio de los distintos morteros hemos llegado a las siguientes conclusiones:

- Los morteros con aditivos poseen un comportamiento mecánico mejor que los morteros sin aditivos.
- El mortero con mejores cualidades para que su uso sea generalizado, a nivel comercial, es el obtenido a base de un 70% filita y un 30% cemento pues es el que posee una resistencia mecánica a flexión y a compresión superior. Esta alta resistencia lo hace el idóneo para resistir la erosión provocada por los efectos climáticos. También el mortero 70/30 se caracteriza por una mayor consistencia que lo convierte en el más idóneo para trabajar sobre paredes verticales. Y lo más importante, es el más económico.
- El mortero realizado con el 80% de filita y un 20% de cemento también posee una gran trabajabilidad para ser usado tanto en superficies horizontales como verticales, pero presenta un 60% menos de resistencia a flexión como a compresión (comparando en el 70/30) y por tanto, no lo habilita para su uso en paredes exteriores sometidas a factores ambientales. Un uso idóneo serían las construcciones rurales destinadas al almacenamiento.
- El mortero fabricado a base de un 90% de filita y un 10% de cemento queda totalmente descartado para su uso comercial por su baja resistencia mecánica a flexión y a compresión, a pesar de ser el más impermeabilizante de acuerdo con los datos de coeficiente de permeabilidad.

Antes de dar los resultados como definitivos, debemos tener en cuenta que los ensayos se han realizado una sola vez para cada tipo de mortero cuando lo correcto hubiese sido repetir cada ensayo al menos diez veces para poder tener unos resultados fiables con la menor dispersión posible. Sin embargo, en una primera aproximación, y como ensayo para establecer criterios de trabajo, son de suma utilidad.

Los ensayos tampoco se han realizado en las mejores condiciones ni con las herramientas adecuadas habiéndose presentado las siguientes dificultades:

- El vaso usado en el ensayo para la determinación de la densidad era un vaso de plástico que se encontraba en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Química.

- Las balanzas disponibles con una precisión de  $\pm 0,01$  gramos no poseían una cubierta que la aislara de las corrientes de aire lo que hacía que oscilaran constantemente dificultando la correcta medida de los aditivos.
- La cámara humedad dispone de un aparato para regular la humedad de la habitación el cual está defectuoso lo que provocó que el suelo de la cámara permaneciera inundado manteniendo la cámara al 100% de humedad relativa durante todo el proceso de fraguado de las probetas.
- No se ha dispuesto de una máquina de rotura a flexión homologada por lo que se tuvo que idear un sistema para usar la máquina de compresión como máquina a flexión.
- La aguja que mide la carga de rotura en la máquina de compresión estaba ligeramente doblada hacia la izquierda, además carecía de espejo en la esfera de las escalas lo que resta precisión a las medidas.

Con motivo de las dificultades encontradas, debemos indicar que este estudio sobre el comportamiento mecánico de los morteros estudiados debería ser considerado como la base para posteriores estudios que se quieran realizar sobre este campo y que dispongan de mejor instrumental.

# CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

---

## 6.1. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, D.R., Watts, J. "Identical rock types with different chemistry: sourcing phyllite-tempered." *Journal of Archeological Science*, nºXXX (2010): 1-11.
- Alsina, J., 2006. "Adhesivo de base cementosa (patente número 2247924)". Oficina Española de patentes y Marcas. Madrid: 5 pp.
- Barrera, M., Garnica, P., "Introducción a la Mecánica de Suelos No Saturados en Vías Terrestres." Sanfandila, Querétaro: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte, 2002.
- Bennett, R.H., Hulbert, M.H. *Clay Microstructure*. D. Reidel, 1986.
- Ciavarella, V., Wyld, S.J. "Wall rocks as recorders of multiple pluton emplacement mechanisms-Examples." *Special Paper of the Geological Society of America* 438 (2008): 517-550.
- Cuevas, J., Navarro-Vilá, F., Tubía, J.M. "Evolución estructural poliorogénica del complejo Maláguide (Coordilleras Béticas)." *Boletín Geológico y Minero* 3, nº 112 (2001): 47-58.
- Fernández, A.E., García, M., Villaroya, F. "Las acequias de careo, un dispositivo pionero de recarga artificial de acuíferos en Sierra Nevada, España. Caracterización e inventario." Editado por J. Merino. *Revista Tecnológica y desarrollo* VI (2006): 1-33.
- García, J., Ramirez, J.I., Teixell, A. «<http://www.igme.es/INTERNET/GEOLOGIA/DOCS/213-PONT-DE-SUERT.DOC>.» 1996. (último acceso: 31 de 05 de 2010).
- Garzón, E., Vázquez, J., Romerosa, A., Serrano, M., Ruiz, A., Sánchez, P.J., "Caracterización y aplicaciones de las filitas (launas) en obras de tierra." *III Congreso Nacional de Agro Ingeniería*. León, 2005.
- Garzón, E., García-Rodríguez, I., Bono, R., Ruíz-Conde, A., Sánchez-Soto, P.J. "Composición y propiedades tecnológicas de filitas de un yacimiento de Berja (Almería)." *Cerámica Información*, 2007: 43-55.
- Garzón, E., García-Rodríguez, I.G., Ruiz-Conde, A. and Sánchez-Soto, P.J., "Phyllites used as waterproofing layer materials for greenhouses crops in Spain: multivariate statistical analysis applied to their classification based on X-Ray fluorescence analysis". *X-Ray Spectrometry*, 38 (2009): 429-438. (
- Garzón, E., Sánchez-Soto P.J. and Romero, E., "Physical and geotechnical properties of clay phyllites". *Applied Clay Science*, 48 (2010): 307-318

- Garzón, E., Ruíz-Conde, A. and Sánchez-Soto, P.J., "Multivariate Statistical Analysis of phyllite samples based on chemical (XRF) and Mineralogical Data by XRD". *American Journal of Analytical Chemistry*, 3 (2012a): 347-363.
- Garzón, E., Sánchez, J.A., Romero, E., Sánchez-Soto, P.J. Influence of chemical and mineralogical characteristics on the permeability of phyllites samples using multivariate statistical analysis," *Applied Clay Science* (In press), 2012b.
- Hoinkes, G., Hauzenberger, C.A., Schmid, R. "Classification, Nomenclature and Formation." *Metamorphic Rocks*, 2005: 386-402.
- Karakitsios, V., Rigakis, N. "Evolution and petroleum potencial of Western Greece." *Journal of Petroleum Geology* 3, nº 30 (2007): 197-218.
- Laird, D.A., "Layer charge influences on the hydration of expandible 2:1 phyllosilicates." *Clays and Clay Minerals* 47, nº 51 (1999): 630-636.
- Lamara, W.T., Derriche, Z., Romero, E. "Case study of swelling induced damage and characterization of an arid climate soil." *Proceedings of International Conference on Problematic soils*, 2005: 25-27.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. "Mecánica de suelos" *Instituto tecnológico de Massachusetts*, 2001.
- López-Lara, T. "Resistencia al esfuerzo cortante en arcillas expansivas de Jurica, Querétaro." *Tesis de maestría*. Universidad Autónoma de Querétaro, 1995.
- López, R. «[Http://www.igme.es/INTERNET/BOLETIN/2006/117\\_ESP\\_2006/ART\\_ AMBIENTE\\_GEODINAMICO\\_Y\\_ART. EL MATERIAL TIPO DE OLA.PDF.](http://www.igme.es/INTERNET/BOLETIN/2006/117_ESP_2006/ART_ AMBIENTE_GEODINAMICO_Y_ART.EL_MATERIAL_TIPO_DE_OLA.PDF)» 2006. (último acceso: 31 de 05 de 2010).
- Nóvoa-Muñoz, J. C., García-Rodeja, E. «Modification of Soil Solid Aluminium Phases During.» *Water Air Soil Pollut: Focus* (Springer Science + Business Media B.V.), nº 7 (01 2007): 235–239.
- Prakash, K. "Revelation of tin and niobium occurrences in Southern Uis Region of Namibia through a geological reconnaissance study." *Trabajos de Geología*, nº 28 (2008): 33-39.
- Rivera, G.A. "Concreto simple", <http://es.scribd.com/doc/58132781/Tecnologia-Concreto-y-Mortero-Rivera-Unicauca>, 2011. (último acceso: 10 del 12 de 2012).
- Ruiz, M.D., "Evidence of contrasting low-grade metamorphic conditions from clay mineral assemblages in Triassic Alpujárride-Maláguide

transitional units in the Betic Cordilleras, Spain" *Clay Minerals*, 41 (2006): 619-636.

- Ruiz, M.D., "Mixed-layer mica-chlorite in very low-grade metaclastites from the Maláguide Complex (Betic Cordilleras, Spain)." *Clay Minerals*, 36 (2001): 307-324.
  - Sousa Santos, P., "Tecnología de Argilas aplicada as argilas brasileiras", Vol. 1, Editorial E. Blücher Ltda., Sao Paulo, Brasil, 1975. 340 pp.
  - Suárez, M.J., Navarro, F.A. "Evolución Histórica de la Morfología Urbana y la Tipología Constructiva en la Comarca de Baza-Huéscar, Provincia de Granada." Editado por la Universidad de Granada. *Cuadernos Geográficos* 1, nº 38 (2006): 171-193.
  - UNE-EN 1015-11: 2000/ A1:2007. "Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido." *AENOR*, 2000: 11.
  - UNE-EN 197-1: 2000. "Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes." *AENOR*, 2000: 25.
  - UNE 83811: 1992 EX "Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la consistencia. Mesa de sacudidas (método de referencia)." *AENOR*, 1992.
- Valera, T.S., Ribeiro, A.P., Valenzuela-Díaz, F.R., Yoshiga, A., Ormanji, W., Toffoli, S.M., "The effect of phyllite as a filler for PVC plastisols", Annual Technical Conference-Society of Plastics Engineers, Vol. 3, 60, 3949-3953 (2002).
- Zheng, Y.F., Zhou, J.B., Wu, Y.B., Xie, Z. "Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin." *Internacional Geology Review*