

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Caracterización de residuos de placas de falso techo de escayola y estudio sobre su posibilidad de reciclado”

Curso 2020/2021

Alumno/a:

Jose Manuel Vicente Cantón

Director/es:

Dra. María Jesús Ariza Camacho





# Resumen

La escayola es uno de los minerales industriales más utilizados en el sector de la construcción, utilizándose principalmente como placas de falso techo o revestimiento, pero también como tabiquería ligera o aditivo. Al año se generan un volumen importante de residuos de escayola que, debido a su capacidad de reaccionar con otros residuos de carácter peligroso, deben ser almacenados en vertederos mediante contenedores especiales hasta el momento de ser destruidos. Como alternativa a este proceso, y debido a su composición química, este Trabajo de Fin de Grado estudia el reciclado de los residuos de escayola procedentes de obra cuando no han sido mezclados con otros residuos.

El trabajo experimental ha consistido en reciclar placas de escayola recogidas de un contenedor de obra, y analizar si el producto obtenido cumple con las propiedades mecánicas requeridas por la Norma para la puesta en obra de yesos de construcción.

Para ello, primero se ha realizado una molienda del residuo de escayola; se ha caracterizado el residuo, para conocer su granulometría y su capacidad para llevar a cabo las reacciones de hidratación del yeso y elegir las composiciones con las que fabricar probetas; y por último, estudiar las propiedades mecánicas de dichas probetas y la influencia que ejercen sobre ellas los parámetros finura de molido y relación agua/yeso, compararlas con los valores obtenidos en probetas de yeso comercial, y discutir si cumplen los requisitos para la puesta en obra y si este método de reciclaje es posible.

# Abstract

Gypsum is one of the most widely used industrial minerals in the construction sector, being used mainly as false ceiling or cladding plates, but also as light partitioning or additive. Every year a significant volume of plaster waste is generated which, due to its ability to react with other hazardous waste, must be stored in landfills using special containers until it was treated conveniently. As an alternative to this process, and due to its chemical composition, this Final Degree Project studies the recycling of plaster waste from construction sites when they have not been mixed with other waste.

The experimental work consisted of recycling plasterboards collected from a construction site container, and analyzing whether the product obtained complies with the mechanical properties required by the Standard for placing construction plasters on site.

To do this, first a grinding of the plaster residue has been carried out; The residue has been characterized, to know its granulometry and its capacity to carry out the hydration reactions of the plaster and to choose the compositions with which to manufacture test tubes; and finally, study the mechanical properties of said test pieces and the influence that the parameters of grinding fineness and water / gypsum ratio exert on them, compare them with the values obtained in commercial gypsum test pieces, and discuss whether they meet the requirements for using in buildings and if this recycling method is possible.

# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción general</b> .....	1
1.1. Interés y objetivos.....	1
1.2. Fases de realización y competencias.....	3
1.3. Cronograma.....	5
<b>Capítulo 2. Revisión bibliográfica</b> .....	7
2.1. Definiciones previas.....	7
2.1.1. ¿Qué es un mineral?.....	7
2.1.2. Mineral industrial.....	7
2.1.3. Yeso.....	10
2.1.4. Escayola.....	12
2.1.5. Tipos de yeso.....	14
2.1.6. ¿Qué es el reciclaje? .....	17
2.2. Placas de escayola como residuo de construcción.....	19
2.3. Escayola y reciclaje.....	21
2.3.1. Reacciones del yeso en la naturaleza.....	21
2.3.2. Reacciones del yeso en la industria.....	23
2.3.3. Iniciativas de reciclaje de yeso .....	25
<b>Capítulo 3. Materiales y métodos</b> .....	27
3.1. Obtención de las placas de escayola.....	27
3.2. Molienda de escayola.....	29
3.3. Determinación de la humedad mediante secado en estufa.....	32
3.4. Granulometría.....	34
3.5. Determinación de la relación agua/yeso según norma UNE-EN 13279-2.....	38
3.5.1. Método de amasado a saturación.....	38
3.5.2. Método de la medida de la fluidez de la pasta.....	40
3.6. Determinación del principio de fraguado.....	42
3.6.1. Método del cuchillo.....	42
3.7. Determinación de las propiedades mecánicas.....	44
3.7.1. Preparación de las probetas de ensayo.....	44
3.7.2. Determinación de la resistencia a flexión.....	50
3.7.3. Determinación de la resistencia a compresión.....	53
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión</b> .....	59
4.1. Caracterización del residuo de escayola.....	59
4.1.1. Determinación de la humedad inicial.....	60
4.1.2. Granulometría.....	61

4.2. Preparación de las mezclas.....	67
4.2.1. Determinación de la relación agua/yeso.....	67
4.2.2. Determinación del principio de fraguado.....	69
4.3. Preparación de las probetas de escayola reciclada.....	70
4.4. Propiedades mecánicas.....	73
4.4.1. Ensayo a flexión.....	73
4.4.2. Ensayo a compresión.....	76
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>83</b>
<b>Capítulo 6. Bibliografía.....</b>	<b>85</b>

# **Capítulo 1. Introducción general**

## **1.1. Interés y objetivos**

En los últimos años, la humanidad ha tomado conciencia de su negativo impacto en el planeta. Las políticas “eco-friendly” son tendencia, y los países buscan, cada vez más, ser respetuosos con el medio ambiente, entendiendo su fragilidad, y el daño que causa el ser humano, siendo un porcentaje importante derivado del sector industrial, ya sea en forma de consumo energético o por la importante generación de residuos.

El cambio climático es uno de los efectos que ya estamos viviendo en la actualidad. Se define como la variación global del clima de la Tierra, y aunque siempre ha existido debido a causas naturales, es innegable la influencia del ser humano de un tiempo a esta parte, debido principalmente al efecto invernadero.

El efecto invernadero es un fenómeno natural por el cual el calor del Sol que llega a la Tierra no es rebotado al espacio en su totalidad, permaneciendo un porcentaje en el planeta, y dando lugar a la temperatura que hace posible la vida tal y como la conocemos. El problema surge cuando, debido al aumento de la actividad industrial y social, han aumentado los gases de la atmósfera capaces de producir este efecto de forma rápida y desproporcionada, multiplicando así el efecto invernadero natural terrestre, y dando lugar a un fenómeno perjudicial.

Estos “gases de efecto invernadero” son el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano, cuya producción ha aumentado un 30% respecto al siglo pasado debido a la industria. Por ello, desde el mundo científico, se busca cambiar los modos de producción con el fin de rebajar la producción de estos gases. Esto es algo que ya estamos apreciando en la industria automovilística, con un aumento significativo de las restricciones para las emisiones de dióxido de carbono.

En el sector de la construcción encontramos el 40% del consumo energético mundial, y una elevada producción de CO<sub>2</sub> (aproximadamente  $\frac{1}{3}$  del generado en todo el mundo). Datos muy significativos, que además se ven incrementados sin nos centramos solo en el sector industrial. La realización de actividades industriales requiere un gran consumo de las materias primas del planeta y genera una gran cantidad de residuos, cuya gestión aumenta el consumo energético. Según los datos de la UE, un 30% de estos residuos provienen de la construcción y la demolición, y por ello es importante llevar a cabo una buena gestión de estos.

El reciclaje es una de las alternativas más interesantes que podemos darle a estos residuos, ya que con ello podemos reducir significativamente el consumo de recursos naturales, y dar más vida a los residuos generados. Claro que no todos los residuos son reciclables, ya que

deben tener una serie de características que hagan posible su reutilización. Esto nos lleva inevitablemente a fijarnos en la escayola.

La escayola es un mineral industrial muy usado en Europa, principalmente en el sector de la construcción. De uso en viviendas, se utiliza para la fabricación de placas de Pladur y falsos techos. Se obtiene del yeso (con un 87% de pureza), el cual posee características únicas como la resistencia al fuego o la absorción acústica, y su composición química lo convierte en un material ideal para el reciclaje, ya que esta no varía en el proceso industrial, lo cual lo convierte en un material que puede reciclarse infinitas veces. De esta forma, reduciríamos tanto el consumo de materias primas como el consumo energético, además de encontrar una forma de gestión de estos residuos. La pregunta es: ¿merece la pena reciclar la escayola? En Europa (y más concretamente España), se emplea un gran volumen de escayola en el sector de la construcción. Por ello, desde la Comunidad Europea se están realizando estudios y análisis para mejorar el uso y la producción de este material.

Este trabajo de fin de grado tiene como objetivo abordar la posibilidad, desde un punto de vista técnico, del reciclaje de placas de escayola obtenidas como residuo de construcción. Aunque por la bibliografía ya se sabe que esto es posible, vamos a comprobar la dificultad que entraña este proceso y a intentar simplificar lo máximo posible este reciclado.

Este objetivo principal podemos dividirlo en los siguientes objetivos parciales:

- a) Obtención y caracterización de los residuos de escayola.
- b) Preparación de los materiales reciclados
- c) Determinación de las propiedades de las probetas de escayola reciclada y posibilidad de comercialización.

Para la consecución de todos estos objetivos utilizaremos la norma UNE-EN 13279 que en su parte 1 regula las características de los yesos y escayolas que se pueden comercializar en España y Europa, y en su parte 2 describe los ensayos necesarios para asegurar las características y calidad de estos materiales. En este trabajo realizaremos los siguientes procedimientos según la norma UNE-EN 13279-2:2006:

- Determinación de la finura de molido (análisis por tamizado)
- Determinación del contenido en agua mediante secado en estufa.
- Determinación de la relación agua/yeso mediante el método de amasado a saturación
- Determinación de la relación agua/yeso mediante el método de medida de la fluidez de la pasta
- Determinación de los tiempos de fraguado mediante el método del cuchillo
- Preparación de las probetas para ensayos mecánicos
- Determinación de la resistencia a flexión
- Determinación de la resistencia a compresión

Con estos ensayos podremos determinar si los diferentes materiales preparados cumplen los requisitos para su puesta en obra, determinando el porcentaje óptimo de agua que admite el yeso sin menoscabar sus propiedades mecánicas, y la finura del yeso, es decir el tamaño máximo de partícula, permisible para que se cumplan los requisitos de la norma.

## 1.2. Fases de realización y competencias

Este trabajo de fin de grado podemos dividirlo en cuatro fases:

- Fase 1: búsqueda bibliográfica, estudio y planteamiento del proyecto.
- Fase 2: obtención de las placas de escayola y molienda de las mismas.
- Fase 3: ensayos de caracterización del material molido, siguiendo la norma UNE-EN 13279-2, y determinación de la relación agua-yeso mediante la aplicación de dicha norma.
- Fase 4: preparación de las probetas de ensayo, en función de los resultados obtenidos en la fase 3, elaboración de probetas y determinación de sus propiedades mecánicas, según la norma UNE-EN 13279-2.
- Fase 5: interpretación de los resultados obtenidos en la fase 3 y 4, y conclusiones finales.
- Fase 6: redacción de la memoria.

A continuación, se describe con detalle cada una de estas fases y su relación con las competencias de la Universidad de Almería:

- 1. Búsqueda bibliográfica.** Una vez elegido el tema del proyecto, se inicia la búsqueda de información al respecto: bibliografía básica, proyectos relacionados, normativa vigente, etc. Para el desarrollo de esta tarea se ponen en práctica diversas competencias como la **UAL2** (habilidad en el uso de las TIC), **UAL5** (crítica a la hora de seleccionar información), **UAL9** (capacidad de trabajar de forma autónoma), **CT3** (conocimiento en materias básicas y tecnológicas, capacidad para aprender nuevos métodos y teorías), **CB2** (comprensión y dominio de conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica), **CRI3** (conocimiento de los fundamentos de los materiales), **CTEM7** (conocimientos y capacidades para la aplicación de la ingeniería de materiales).
- 2. Obtención de los restos de yeso y molienda.** Al ser el proyecto una investigación sobre el reciclaje de placas de escayola, la materia prima principal (el yeso) es obtenido de los residuos de construcción de una obra. Se consiguen varias placas de escayola, las cuales son molidas para obtener un material granulado que pueda ser usado de nuevo como conglomerante a base de yeso. La molienda se realiza de forma manual mediante un mazo, al no disponer en el laboratorio de equipos para ello, desarrollando la **UAL3** (capacidad para resolver problemas).
- 3. Ensayos y caracterización del material.** Una vez obtenida la cantidad necesaria de conglomerante a base de yeso, se procede a aplicar algunos de los ensayos de caracterización recogidos en la norma UNE-EN 13279-2. Con estos ensayos, se busca concretar la granulometría del producto granulado recuperado, la relación agua/yeso óptima en función del tamaño de grano, y determinar el tiempo de fraguado. De esta forma, aplicamos las competencias **UAL1** (conocimientos básicos de la profesión), **CT3** (aprendizaje de nuevos métodos y teorías), **CT4** (capacidad de resolver problemas con creatividad



en el campo de la Ingeniería Industrial), **CT5** (conocimiento para la realización de mediciones, cálculos y valoraciones), **CT6** (capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento), **CB1** (capacidad para la resolución de problemas matemáticos), **CB4** (comprender y aplicar conocimientos básicos de química), **CRI3** (conocimientos de los fundamentos de los materiales), **CTEM7** (conocimientos y aplicación de la ingeniería de materiales).

- 4. Determinación de las propiedades mecánicas.** El objetivo del proyecto es saber si es viable reciclar la escayola en construcción. Para su puesta en obra, debe cumplir una serie de propiedades mecánicas descritas en la norma UNE-EN 13279-2. Para ello, primero debemos preparar las probetas de ensayo, procedimiento también descrito en la norma, con una relación agua/yeso determinada en la fase previa. Una vez preparadas las probetas, procedemos a la determinación de la resistencia a flexión y compresión, ensayos descritos en la norma, haciendo uso de las competencias **CRI8** (conocimiento y aplicación de los principios de la resistencia de materiales), **CTEM4** (conocimientos y capacidades para aplicar los fundamentos de la elasticidad y la resistencia de materiales al comportamiento de sólidos reales), **CTEM7** (conocimientos y aplicación de la ingeniería de materiales), **CB3** (conocimientos sobre el uso de programas informáticos con aplicación en ingeniería).
  
- 5. Análisis de los resultados y conclusiones.** Los resultados obtenidos en la investigación los analizaremos de forma gráfica, con el fin de plasmarlos de forma directa y visual. Analizar los problemas encontrados y proponer soluciones a los mismos, con el objetivo de aportar una solución sostenible al problema de la contaminación y el malgasto energético en el sector de la construcción, aplicando la **CT4** (capacidad de resolver problemas en el campo de la ingeniería industrial), **CB3** (conocimientos sobre el uso de programas informáticos con aplicación en ingeniería).
  
- 6. Redacción de la memoria.** Elaboración y redacción de los documentos, gráficos y fotografías pertenecientes a este Trabajo de Fin de Grado, desarrollando competencias de comunicación, síntesis y transmisión de ideas (**UAL4**), capacidad para comprender y aplicar conocimientos de ingeniería (**CB4**) capacidad de trabajo de forma autónoma (**UAL9**), uso de las TIC (**UAL2**) y programas informáticos aplicados a la ingeniería (**CB3**)

### 1.3. Cronograma

En el siguiente cronograma se muestra la distribución de las horas empleadas en la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado a lo largo de los meses, y una estimación de las horas empleadas en cada fase del mismo.

	2020						2021	$\Sigma$ (horas)
	MAYO	JUNIO	JULIO	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	MAYO	
Búsqueda bibliográfica	15	5	5	15	10	5		55
Obtención de materiales y molienda		26	40					66
Ensayos de caracterización			20					20
Preparación probetas y determinación de propiedades mecánicas			35					35
Análisis de resultados				5	30	30		65
Redacción memoria				30	40	50	25	145
$\Sigma$ (horas)	15	31	100	50	80	85	25	371



## **Capítulo 2. Revisión bibliográfica**

Este capítulo está dedicado a recopilar y explicar la información que es necesario conocer antes de abordar la cuestión que se plantea como objetivo en este TFG: ¿cómo se puede realizar el reciclaje de las placas de escayola procedentes de los residuos de construcción? Para ello, empezaremos definiendo el yeso como mineral y viendo la importancia industrial de este mineral en España, luego explicaremos las diferencias que podemos encontrar dentro de la familia de los yesos de construcción, y terminaremos con el proceso de reciclaje de la escayola.

### **2.1. Definiciones previas**

#### **2.1.1. ¿Qué es un mineral?**

Podemos definir mineral como una sustancia natural, sólida e inorgánica, que posee estructura atómica y composición definida, y presenta una estructura cristalina concreta. Se pueden encontrar en la superficie o en las diversas capas de la corteza terrestre, formando rocas.

Se clasifican principalmente en dos grandes grupos: minerales metálicos y no metálicos.

Se clasifican según su composición química y su estructura interna, lo cual tiene como resultado una amplia gama de clasificaciones, las cuales a su vez se dividen en familias (clasificación química), que a su vez se subdividen en grupos (clasificación cristalográfica y estructural), los cuales se pueden clasificar por su especie (misma estructura, distinta composición química) para finalmente subdividirse en variedades (composición química no usual).

Dentro de esta clasificación podemos diferenciar dos grupos de interés: los minerales metálicos y los minerales industriales (no metálicos). Este último grupo es el que nos interesa en este estudio, y será definido con detalle en el siguiente punto.

#### **2.1.2. Mineral industrial**

Se conoce como mineral industrial al conjunto de rocas y minerales, naturales o sintéticos, y mayoritariamente no metálicos, cuya explotación busca aprovechar sus propiedades físicas o químicas en procesos industriales. Suelen emplearse de múltiples formas como materias primas, directamente después de extraerlo o después de un tratamiento previo.

No se consideran minerales industriales aquellos minerales cuyo fin es la extracción de metales; tampoco aquellos minerales que se utilizan por su contenido energético; minerales que solo tienen valor estético u ornamental; y aquellos minerales no áridos que se utilizan en construcción.

Es un sector en auge ya que, conforme pasan los años y aumenta la tecnología, se van encontrando más aplicaciones para los minerales industriales, en campos tan importantes como la construcción, la salud o la energía. Se usan para fabricar productos de uso cotidiano, como pueden ser ventanas, ladrillos o papel. La mayoría de las cosas que tenemos alrededor están formadas por minerales industriales, o se han fabricado gracias a ellos, lo cual nos hace tomar conciencia de su versatilidad. Por eso, el consumo de este tipo de minerales no hace más que aumentar.

El uso o importancia de un mineral industrial está intrínsecamente ligado a la tecnología de la que dispongamos en ese momento concreto. Puede darse el caso que un mineral tenga unas propiedades físicas interesantes, pero aún no se haya inventado la tecnología que le dé una aplicación.

Algunas de las propiedades a destacar de los minerales industriales son:

- Dureza
- Blancura
- Colorantes
- Eléctricas
- Mecánicas

En general, tienen una serie de características que permiten distinguirlos de otros tipos de minerales. Las principales son:

- Sólidos
- Se pueden encontrar solos o en rocas
- Inertes
- Suelen necesitar tratamientos previos a su uso
- Por lo general, abundan en la naturaleza, aunque hay algunos que solo aparecen en condiciones muy especiales y son escasos.

Podemos hacer una pequeña clasificación de los minerales industriales, basándonos en el uso que reciben. De esta forma, aparecen dos grandes grupos: los minerales químicos y los minerales físicos. Esta clasificación no es del todo rigurosa, ya que hay minerales que aparecen en ambos grupos, pero nos ayuda a comprender mejor el porqué de su interés.

#### a) Los minerales químicos

Su interés comercial reside en su contenido de algún elemento químico concreto. Por tanto, sus propiedades físicas quedan en un segundo plano. Se venden basándose en su composición química.

No se usan en el material vendible en su forma original, ya que lo que se quiere de ellos es alguno de los elementos químicos que contiene, por lo que en su procesado reaccionan químicamente y se transforman.

Se utilizan principalmente en las industrias químicas, cerámica, de fertilizantes y metalúrgica.

b) Los minerales físicos

Son minerales que pueden usarse sin necesidad de ningún proceso industrial, ya que sus propiedades físicas los hacen valiosos. Factores como la resistencia, la dureza o la blancura son suficientes para dotarlos de interés comercial.

Los minerales físicos se dividen en siete grupos, según su uso:

1. Minerales estructurales
2. Minerales para carga en la fabricación de materiales
3. Pigmentos
4. Abrasivos
5. Materiales para fundición
6. Minerales para la industria eléctrica
7. Materiales auxiliares en los procesos como filtros, catalizadores, etc.

Los minerales industriales tienen una gran variedad de aplicaciones, en función de sus propiedades. Los más importantes son:

- Como abrasivos y herramientas de corte. A partir de algunos materiales cerámicos, como el óxido de aluminio o el nitrato de silicio, se fabrican herramientas de corte cerámicas, capaces de soportar altas temperaturas sin necesidad de refrigerante. También el diamante, por su gran dureza, se utiliza como herramienta de corte para el mecanizado de materiales muy duros.

Otros minerales como el yeso o el talco se utilizan también por su dureza, pero en este caso es por su baja dureza como lubricantes y protectores de superficies pulidas.

- La agricultura y la industria de los fertilizantes. A partir de los fosfatos naturales (o rocas fosfóricas), en combinación con ácidos minerales, se obtienen abonos minerales, llamados fertilizantes fosfatados.

Otros minerales usados en la agricultura son los nitratos, potasas, azufre, caliza, dolomía, turba y yeso.

- Papel. Aunque el componente principal es de origen vegetal (celulosa), se emplean minerales industriales como cargas para dar compacidad y blancura a la pasta o para hacer estucados. Los principales son el talco, el caolín, el carbonato cálcico y dióxido de titanio.
- Materiales de construcción. Uno de los sectores más conocidos. Se utilizan minerales por sus propiedades estructurales o con uso ornamental. Algunos ejemplos son los áridos de granulometrías muy variadas, cales, yesos, rocas ornamentales, perlita, arcillas, etc.
- La industria cerámica. Para la fabricación de abrasivos, vidrio, refractarios, ladrillos, azulejos, etc. En ladrillería se utilizan arcillas rojas, mientras que en la cerámica blanca se emplea caolín, arenas silíceas y feldespatos.

Algunos de los más utilizados son: arcillas, feldespatos, talco, sílice y otros.

- Industria química. Para fabricar pinturas y barnices, cosméticos, plásticos, adhesivos, detergentes y jabones, insecticidas, etc. Esta industria algunas veces hace un uso del mineral por su composición química y otras veces lo utiliza tal cual como cargas o mineral de relleno.

Es un importante consumidor de minerales como boratos, bromatos, caliza, fluorita, litio, azufre, yeso...

- Electricidad, electrónica y óptica. Los componentes eléctricos, electrónicos y ópticos son fabricados con minerales. Materiales básicos para estas industrias como el silicio de grado electrónico o la fibra de vidrio se fabrican a partir de cuarzo. Otros minerales más exóticos son fuente de elementos escasos en la naturaleza que son necesarios para la fabricación de los materiales semiconductores, superconductores, ferroeléctricos, piezoeléctricos y magnéticos que se utilizan en la tecnología de hoy día. Por ejemplo, la franckeita es un mineral de la familia de las sulfosales con el que se están realizando investigaciones para el sector electrónico, por sus propiedades semiconductoras y sus potenciales aplicaciones en el desarrollo de fotodetectores o celdas solares.

Otros minerales usados son las micas, las pizarras, el coltán, etc.

- Tratamiento de aguas y usos ambientales como la gestión de basuras, residuos y gases contaminantes.
- Industria de productos alimenticios y bebidas. Se utiliza cal para la obtención de azúcar, sal para las conservas, turba para el filtrado de licores, etc.
- La industria metalúrgica. Materiales fundentes, electrodos para soldadura, arenas de moldeo, refractarios para hornos y crisoles, etc.
- Industria del gas y el petróleo, en refinerías, perforaciones, etc.

España es el único productor de Europa de varios minerales industriales de interés como son feldespato, sulfato sódico y celestina, el primero del mundo en producción de sepiolita y el segundo en producción de celestina (sulfato de estroncio). Por tanto, es una industria destacada en nuestro país. En concreto nuestro país es el quinto en producción de yeso (sulfato de calcio hidratado), situándose en Sorbas en la provincia de Almería la mayor cantera de yeso de Europa, lo cual es una motivación más para abordar este proyecto.

### **2.1.3. ¿Qué es el yeso?**

Para entender qué es el yeso, primero tenemos que diferenciar entre el yeso mineral, y el yeso como producto industrial ya que, al nombrarse de la misma forma, puede dar lugar a confusión.

El yeso, también conocido como piedra de yeso o aljez, es un mineral compuesto de sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), es abundante y fácil de encontrar, constituyente común de rocas sedimentarias y suelos formados por evaporación o hidratación de anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Cristaliza en el sistema monoclinico.

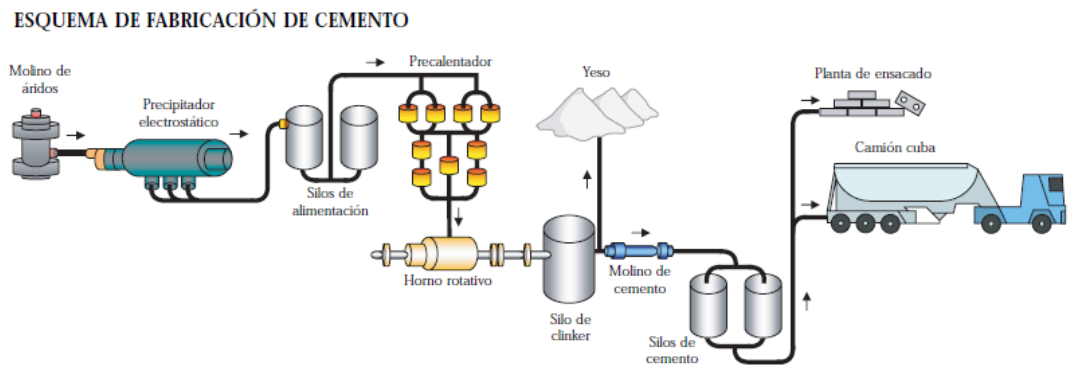
El origen de los depósitos de yeso se debe a la evaporación de disoluciones acuosas sobresaturadas en lagos o mares de poca profundidad. En el caso de España, tenemos que

remontarnos al Triásico y el Cenozoico para datar las formaciones de yeso más importantes que se están explotando industrialmente hoy en día. También puede aparecer como consecuencia de la reacción química entre el ácido sulfúrico con rocas carbonatadas, por la acción de gases volcánicos sobre la roca que lo rodea, eflorescencias en minas y espeleotemas en cuevas.

El yeso, como producto industrial, es sulfato de calcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) (con menos agua en la estructura que el yeso como mineral). Se comercializa molido o en polvo, y se utiliza principalmente en el sector de la construcción, donde se usa directamente mezclado con agua para fabricar elementos ligeros para interior.

Algunas de las industrias consumidoras de yeso como mineral industrial son:

- Construcción. Para la fabricación de aglomerantes, molduras o revestimientos. Es muy importante en la fabricación de cemento portland como regulador del fraguado (Figura 2.1).



**Figura 2.1. Esquema del proceso de fabricación del cemento en el que se usa yeso.**

- Abonos y fertilizantes. Aunque en menor medida que otros minerales industriales, también hay consumo de yeso.
- Pintura. En este sector el yeso se utiliza como aglutinante, es decir, para adherir los distintos elementos colorantes. También para preparar superficies para la pintura al fresco, o para la elaboración de tizas.
- Industria química. Para la fabricación de productos de limpieza.
- Papel. Aplicado mediante estuco, para dar textura.
- Sanitario. En odontología, se utiliza yeso para hacer moldes de la boca. En medicina tiene usos quirúrgicos, siendo el vendaje de escayola el más conocido.





*Figura 2.2. Molde odontológico fabricado en yeso.*

#### **2.1.4. Escayola**

Se denomina escayola a un tipo de yeso caracterizado por tener una pureza en aljez superior al 90% (el yeso como producto industrial tiene típicamente un 70% de yeso mineral), y una granulometría más fina que la del yeso industrial.

Es un material muy utilizado en el sector de la construcción. Debido a su bajo precio, su color blanco y su grano muy fino, sin apenas impurezas, es usual verlo en “falsos techos” y acabados decorativos en edificios (Figuras 2.3 y 2.4). Desde el punto de vista industrial, no hay diferencia entre yeso y escayola, nombrándose de una forma u otra para lo mismo: escayola o yeso de proyectar, escayola o yeso de acabado, etc.



*Figura 2.3. Falso techo fabricado en escayola.*



**Figura 2.4. Molduras decorativas de escayola.**

En el sector construcción, la escayola tiene distintas formas de uso:

- Amasada con agua, formando una pasta, se utiliza para enlucidos que requieran un acabado fino y sujeciones.
- Moldeada en fábricas o en taller, para elementos decorativos como molduras o bustos (Figura 2.4). Es uno de sus usos más extendidos. Se rellena el molde en cuestión con el material y se deja fraguar hasta que endurezca. Aunque su uso es puramente ornamental, tiene una gran popularidad en todo el mundo, donde se fabrican columnas, bustos y hasta mobiliario (con fines decorativos).
- En placas, paneles o planchas. Mezclada con fibra de vidrio para darle una mayor resistencia, para elaborar falsos techos o tabiques para espacios interiores (Figura 2.3 y 2.5). La tabiquería de escayola es fácil de instalar, se ensambla con cola y se traban las esquinas.



**Figura 2.5. Vista de sección de un tabique de Pladur.**

El Pladur (Figura 2.5), también conocido como cartón-yeso o placa de yeso laminado, es un material muy utilizado en todo el mundo para la construcción de tabiques, debido a su bajo precio y su facilidad de montaje.

Es un material con excelentes propiedades de aislamiento acústico y térmico, al igual que el yeso. También tiene una buena resistencia al fuego, y en comparación con el yeso, presenta una resistencia a la humedad superior que éste.

También es ligero, lo que facilita el montaje de paneles y molduras. Además, su color blanco permite ser pintado.

En contra, hay que tener en cuenta que no es un material con alta resistencia a la humedad, y por eso su principal uso es en interiores, ya que una exposición al agua lo deterioraría muy rápido. Si el local presenta humedad por capilaridad, es aconsejable aplicarle una capa superficial de aislamiento contra la humedad.

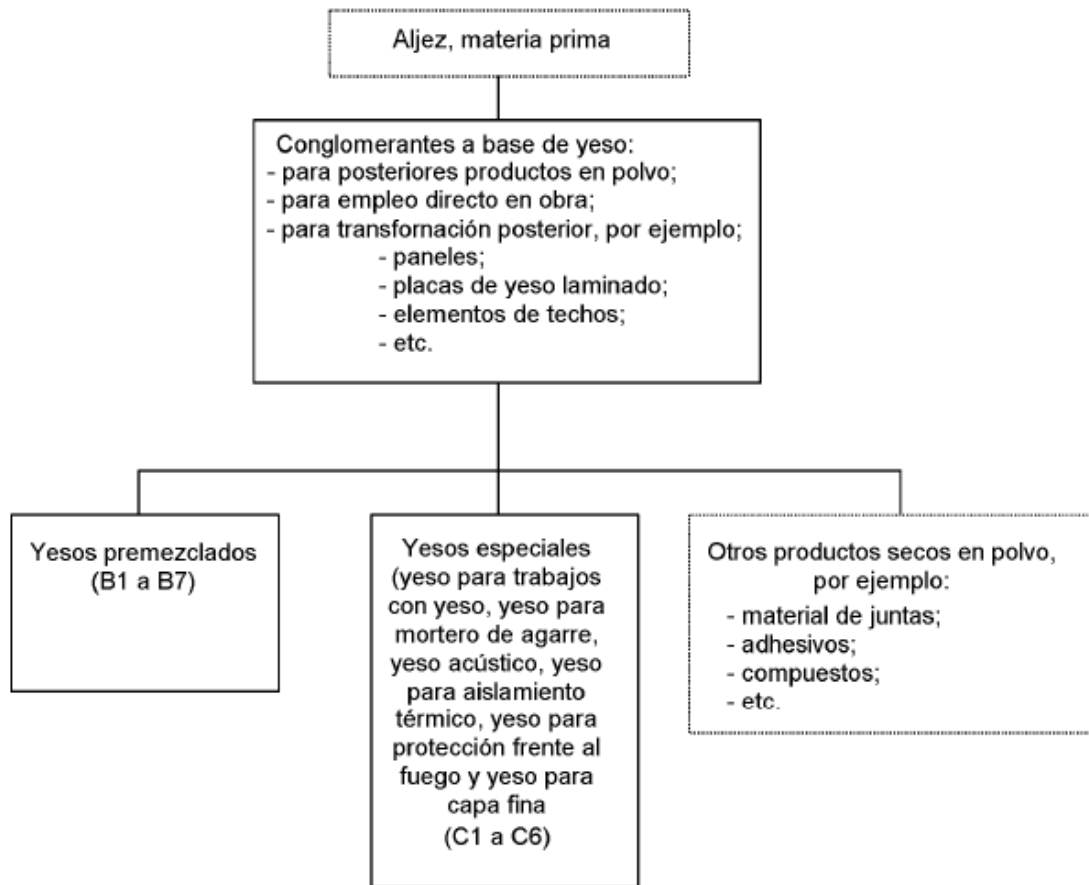
La escayola es un producto ecológico. Como residuo, no es contaminante, aunque debido a las reacciones químicas que pueden aparecer al entrar en contacto con otros residuos, requiere un tratamiento especial.

### **2.1.5. Tipos de yesos y conglomerantes a base de yeso para la construcción**

En general, según su composición química y uso, podemos clasificar el yeso para la construcción en cuatro grupos:

- Yeso de moldeo: yeso compuesto principalmente por hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ), y en menor parte por anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Su empleo principal es la fabricación de piezas por moldeo, y como aditivo para morteros de cal.
- Yeso de enlucido: yeso compuesto por dihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ), hemihidratos alfa y beta y anhidrita en todas sus fases. Se emplea como revestimiento, una fina capa que sirve de terminación del guarnecido.
- Yeso de revoque: este yeso está compuesto únicamente por anhidrita, en fases I y II. Se utiliza como base para fijar baldosas, pinturas y papel de tapizar. Además, sirve de regulador de humedad.
- Yeso marmoleado: tiene la misma composición química que el de revoque. Se utiliza como recubrimiento texturizado, muy decorativo, ya que da una excelente imitación al mármol.

La puesta en obra de yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso está regulada por la norma UNE-EN 13279. En la parte 1 de esta norma se recoge la clasificación de todos los productos de construcción basados en yeso, que se puede ver en la Figura 2.6 (tabla tomada directamente de la norma).



**Figura 2.6. Clasificación de los yesos de construcción en tres familias según la norma UNE 13279-1:2008.**

La norma distingue básicamente dos tipos de productos con yeso que se usan en obra:

- Conglomerantes a base de yeso: Los conglomerantes a base de yeso pueden obtenerse por calcinación del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) y están constituidos por sulfato de calcio en sus varias fases de hidratación, por ejemplo, hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ) y anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Cuando se mezclan con agua, el conglomerante a base de yeso se emplea como ligante para unir partículas sólidas mediante un proceso de fraguado, como el cemento.
- Yeso para la construcción: El término yeso para la construcción incluye todos los tipos de yeso para la construcción, morteros de yeso y morteros de yeso y cal que se utilizan en la construcción. Ya viene premezclado con los otros minerales que se necesiten para formar el mortero únicamente añadiendo agua.

Con estos yesos ya se pueden hacer elementos prefabricados como las placas de escayola para techos o los elementos prefabricados en staff, que luego se colocan directamente en obra con o sin un adhesivo basado también en yeso.

Dentro de los yesos para construcción y para aplicaciones especiales la norma distingue los siguientes tipos de yeso:

- Yeso de construcción: Conglomerante a base de yeso con un mínimo de un 50% de sulfato de calcio como componente activo principal, y con un contenido en cal (hidróxido de calcio) inferior al 5%. El fabricante puede añadir aditivos y agregados.

- Mortero de yeso: Yeso para la construcción con un contenido inferior al 50% en sulfato de calcio como componente activo principal y con un contenido en cal (hidróxido de calcio) inferior al 5%. El fabricante puede añadir aditivos y agregados.
- Mortero de yeso y cal. Yeso de construcción igual que el mortero de yeso, pero con más de un 5% de contenido en cal.
- Yeso de construcción aligerado. Es un yeso de construcción en el que, además de sulfato de calcio y cal, hay agregados ligeros orgánicos o inorgánicos, como perlita.
- Yeso de construcción de alta dureza. Cuando se requieren revestimientos de mayor dureza superficial, se formula este yeso de construcción.
- Yeso fibroso (yeso para staff). Para la fabricación y ensamblado de elementos prefabricados de yeso se elabora este yeso.
- Mortero de agarre. Se utiliza para cerrar muros no portantes, tabiques y techos.
- Yeso de propiedades mejoradas. Son yesos formulados para tener potenciadas algunas de sus propiedades. La norma contempla: yeso acústico, yeso aislante térmico, yeso para protección frente al fuego.
- Yeso para capa fina. Cuando se requiere aplicarlo en capas entre 3 y 6 mm de espesor.

En la tabla de la Figura 2.7 podemos ver la identificación mediante una letra y un número de todos estos tipos de yesos, la cual debe estar impresa en cualquier producto de este tipo que se comercialice en España de acuerdo con esta norma.

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso, por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> <li>– para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos);</li> <li>– para su empleo directo en la obra;</li> <li>– para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado, en placas para techos).</li> </ul>	A – – –
Yeso para la construcción: <ul style="list-style-type: none"> <li>– yeso de construcción;</li> <li>– mortero de yeso;</li> <li>– mortero de yeso y cal;</li> <li>– yeso de construcción aligerado;</li> <li>– mortero aligerado de yeso;</li> <li>– mortero aligerado de yeso y cal;</li> <li>– yeso de construcción de alta dureza.</li> </ul>	B B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7
Yeso para aplicaciones especiales: <ul style="list-style-type: none"> <li>– yeso para trabajos con yeso fibroso;</li> <li>– yeso para morteros de agarre;</li> <li>– yeso acústico;</li> <li>– yeso con propiedades de aislamiento térmico;</li> <li>– yeso para protección contra el fuego;</li> <li>– yeso para su aplicación en capa fina.</li> </ul>	C C1 C2 C3 C4 C5 C6

**Figura 2.7. Tipos de conglomerantes a base de yeso y yesos para la construcción y su identificación comercial según la norma UNE 13279-1:2008.**

Además de esta designación y clasificación y la referencia a esta norma, en el embalaje del producto que se comercializa debe aparecer el tiempo de fraguado y la resistencia a compresión. Estos dos parámetros se deben determinar de acuerdo con la parte 2 de la norma, y ya que son claves para la comercialización de los productos de yeso para construcción serán los más interesantes para determinar en nuestro producto reciclado.

La norma también proporciona los valores mínimos de resistencia al fuego, resistencia térmica y comportamiento acústico que tendrá que cumplir el producto para aplicaciones donde estas especificaciones sean importantes, y los valores aceptables del contenido en yeso, finura del molido, tiempo de principio de fraguado, resistencia a flexión y a compresión, dureza superficial y adherencia que se deben cumplir en todas las aplicaciones del yeso en construcción.

De todos los valores que se pueden consultar en la norma, para este TFG nos interesa que la resistencia a la flexión mínima que debe tener un yeso para la construcción es de 1,0 N/mm<sup>2</sup> y la resistencia a la compresión debe ser mayor de 2,0 N/mm<sup>2</sup>. Estas restricciones son más elevadas en algunos de los yesos para aplicaciones especiales, para los que además se exige que la finura del molido sea muy alta, con un tamaño máximo de partícula de 200 micras y con menos de un 10% de partículas de tamaño mayor o igual a 100 micras.

### **2.1.6. ¿Qué es el reciclaje?**

El reciclaje es un proceso que consiste en aprovechar los residuos para obtener materias primas o nuevos productos.

Prácticamente desde que poblamos la tierra, los seres humanos hemos reutilizado materiales. Con los primeros asentamientos, se empiezan a producir los primeros residuos, aunque estos no empiezan a suponer un problema hasta la aparición de las primeras civilizaciones, agravado con el descubrimiento y uso del fuego.

En el periodo prehistórico, con los primeros asentamientos, el reciclaje era un medio de vida para estas comunidades. Cualquier utensilio de piedra que dejaba de servir, junto con trozos de sílex y huesos, eran utilizados para fabricar herramientas nuevas, como cuchillos.

Según el doctor en física Pere Roura, de la universidad de Girona, podemos considerar el inicio del reciclaje en el momento en que da comienzo la fabricación de materiales. Cuanto más valioso sea el material del objeto usado, más motivación tendrá su reciclaje, ya que estaremos ahorrando trabajo y energía. Por ejemplo, es más caro fabricar hierro, que reaprovecharlo. Por tanto, podemos decir que las primeras motivaciones para reciclar son puramente económicas.

Durante la revolución industrial no existe necesidad de reciclar, ya que la fabricación automatizada y los bajos costes de producción, además de la producción masiva de materiales, hacen que sea más barato comprar productos nuevos que reutilizar los viejos.

En la primera mitad del siglo XX hubo un cambio de paradigma. La situación económica global, consecuencia del crack de 1929 y la Segunda Guerra Mundial, es devastadora. La pobreza y el desempleo hace que la reutilización de materiales viejos sea necesaria, incluso obligada, para poder sobrevivir.

La segunda mitad del siglo XX, ya con la economía recuperada, empieza de nuevo la producción masiva de nuevos artículos, y aumenta la generación de residuos. En 1970 se crea en Estados Unidos la Agencia de Protección Ambiental, una agencia federal cuyo objetivo principal es la protección de la salud y el medioambiente. Este organismo surge como una respuesta de productores y consumidores a la contaminación generada por la producción industrial y el uso de materiales no reciclables, como envases de plásticos, y una mayor concienciación con el medio ambiente.

Desde entonces, reciclar basura se ha ido convirtiendo en algo cotidiano, siendo lo normal a día de hoy tener contenedores dedicados a reciclaje de plásticos, vidrios y envases en todos los barrios. El estado de la capa de ozono, cada vez más deteriorada, ha ayudado a concienciar a la gente sobre la importancia del reciclaje, y la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero.

Actualmente, la preocupación por el medioambiente se ha convertido en un asunto de carácter gubernamental. La población está cada vez más interesada en saber cómo van a afrontar los políticos el problema medioambiental, tanto a nivel de reciclaje, como en el uso de energías renovables o el control sobre la emisión de gases provocada por la circulación de vehículos a motor. Desde el punto de vista empresarial, cada vez se exige a los fabricantes un mayor control sobre el origen y consumo de materias primas, estableciendo límites y penalizaciones, e incentivando el uso de material reciclado mediante ayudas.

Con el reciclaje cumplimos varios puntos cruciales para la sociedad en general y el planeta:

- Reducimos el consumo de material primas, algunas de ellas limitadas, cuyo proceso de extracción conlleva un importante consumo energético y emisión de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. Esta reducción en la explotación de recursos naturales favorece la sostenibilidad del planeta, cuyos recursos son limitados.
- Reducir el consumo de energía significa, en muchos casos, reducir el consumo de combustibles y, por tanto, la contaminación del aire. La reacción de combustión produce CO<sub>2</sub>, uno de los principales gases de efecto invernadero. Aunque no es la única fuente de CO<sub>2</sub>, aporta un volumen importante a la atmósfera, de ahí la importancia de reducir el consumo de combustibles. Además, los llamados combustibles fósiles son un recurso escaso y caro, por lo cual es esencial para la sostenibilidad del planeta cambiar nuestra forma de vida y depender lo menos posible de ellos.
- Fabricamos productos nuevos. Cada vez es más común la fabricación, de forma casera o industrial, de productos cotidianos basados en el reciclaje. Desde ropa hasta muebles o gafas, la oferta de productos reciclados es cada vez mayor. Hay empresas que se dedican puramente a la fabricación de productos reciclados.
- Creación de puestos de trabajo. Para la recogida de los distintos materiales y su clasificación, es necesario la existencia de empresas y trabajadores que lo lleven a cabo. En España existen empresas como Ecoembes y Ecovidrio, que se encargan de la gestión de los plásticos y los vidrios, respectivamente.
- Cuidar el medio ambiente. Los vertidos procedentes de la actividad industrial contaminan ríos, destruyen hábitats naturales, y comprometen la sostenibilidad del planeta. Mediante el reciclaje: disminuimos la contaminación del aire al reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero; reducimos la producción de plásticos, un material tóxico que permanece en el medio más de 100 años hasta su descomposición; reducimos el uso de fertilizantes químicos al usar los residuos orgánicos como abono; y por último, controlamos la gestión y almacenamiento de residuos para que no acaben acumulándose en nuestros mares y ríos.

## **2.2. Placas de escayola como residuo de construcción**

En todos los países la construcción es una actividad de gran importancia, y una gran generadora de residuos.

En España, la producción de residuos se ve agravada por dos motivos:

- La facilidad para obtener áridos baratos y de gran calidad
- Tenemos una gran disponibilidad de terrenos aptos para el vertido

Existe también el pensamiento erróneo de que los residuos derivados de la construcción no son peligrosos, no desprenden olores ni atraen parásitos, y pueden ser dejados en cualquier sitio. Esto es cierto para la mayoría de los residuos, pero hay algunos que si entrañan peligro para el ser humano y el medio ambiente, y requieren un almacenamiento específico.

En Europa, el 30% de los residuos generados son residuos de construcción y demolición (RCD), y aunque muchos de estos materiales podrían reutilizarse, la gran mayoría acaban en el vertedero.

Entendemos por residuos de construcción y demolición a los restos procedentes de:

- Puntos de extracción de áridos destinados a la construcción, como canteras.
- Obras, ya sean de construcción de nuevos edificios, rehabilitación o reformas, de grandes o pequeñas dimensiones.
- Restos defectuosos, procedentes de la fabricación de materiales destinados a la edificación u obra civil.

Cuantificar el volumen total de los RCD producidos anualmente es casi imposible. Muchos de estos residuos se vierten o abandonan sin ningún tipo de control o registro. Además, hay diferentes criterios a la hora de contabilizar las tierras que se generan en las obras, existiendo estudios que las toman como RCD y otros que no. Esta disparidad de criterios imposibilita conocer el volumen anual de RCD de forma exacta.

Sin embargo, a la hora de clasificar la composición de los residuos si hay un criterio uniforme. Las mediciones dicen que los residuos inertes de origen pétreo, conocidos coloquialmente como escombros, contribuyen con un 75% al volumen total. El resto, es una mezcla de materiales con orígenes y peligrosidades diferentes.

Conocer y clasificar los diferentes RCD es imprescindible, ya que algunos pueden requerir un almacenamiento específico para evitar la contaminación, mientras que otros pueden ser reciclados. Lo más óptimo es hacer esta clasificación en el origen, la propia obra, ya que si se mezclan podemos complicar el proceso de reciclaje, haciéndolo imposible en algunos casos.



Se siguen dos criterios para clasificar los residuos: según su origen y según su naturaleza.

El origen de los RCD puede ser:

- a) Puntos de extracción de áridos o puntos de obra donde solo se realicen movimientos de tierra. Los residuos son pétreos, inertes y están libres de contaminación de otras sustancias.
- b) Obras de construcción. En su mayor parte, un 75% según los estudios, son residuos pétreos y cerámicos, limpios de contaminación. Sin embargo, el 25% restante son residuos de procedencia variada, desde vidrio, madera o papel, hasta residuos peligrosos y/o contaminantes, como disolventes, pinturas o plásticos.
- c) Obras de demolición. Son muy similares a los residuos de construcción en cuanto al reparto de residuos limpios-contaminantes. El problema radica en lo mezclados que están, haciendo imposible su separación en muchos casos. Para eso, tiene que realizarse una demolición selectiva, de forma que puedan separarse los materiales para almacenamiento o reciclaje, y aun así, habrá una fracción importante que no se podrá separar.

La naturaleza de los residuos está muy relacionada con su procedencia. Distinguimos entre:

- a) Residuos inertes. La mayoría de los RCD pertenecen a esta categoría. Popularmente conocidos como escombros, son residuos no peligrosos que no experimentan cambios químicos, físicos o biológicos relevantes. En este grupo no entran materiales que reaccionan con otras sustancias, como combustibles. No perjudican a la salud humana.  
Serían los residuos con origen en puntos de extracción de áridos o movimiento de tierras, y el porcentaje de escombros de las obras de construcción, siguiendo la clasificación anterior.
- b) Residuos no peligrosos. En sí mismos no suponen ningún problema de toxicidad. Sin embargo, son reactivos en presencia de otros residuos, dando lugar a reacciones físicas o químicas cuyo resultado es contaminante para el medio o peligroso para el ser humano. La madera o el yeso son algunos ejemplos de este grupo.
- c) Residuos tóxicos y peligrosos. Su volumen no es muy elevado dentro de los RCD, pero son sustancias tóxicas y peligrosas, por lo que su manipulación y traslado está recogido en la legislación. Requieren contenedores especiales, para no contaminar a los residuos inertes, y no producir reacciones con los residuos no peligrosos, o por ser radiactivos. Este grupo son el motivo por el que distinguimos entre los RCD con origen en obra o de demolición, ya que en el segundo caso formarían una mezcla heterogénea con los residuos inertes.

El yeso es uno de los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo, representando entre un 0,5 y 1,5 % de los residuos totales generados en el sector. Teniendo en cuenta los metros cuadrados construidos en los países que componen la Unión Europea, se generan unas 2.350.000 toneladas/año entre residuos de yeso procedentes de la construcción y demolición.

El yeso se utiliza principalmente para la fabricación de placas de falso techo, aunque también en enfoscados, molduras, etc. Como residuo de construcción, se clasifica como un residuo no peligroso de construcción y demolición. No es inerte, porque es una sustancia soluble en agua, pudiendo contaminar aguas u otros residuos.

Cuando el yeso va con otros materiales procedentes de obra o demolición como cemento, hormigón o ladrillo, los contamina, siendo inviable su separación, y además teniendo un alto coste su eliminación. Sin embargo, cuando son placas o techos de escayola, es fácil su separación de otros residuos. En estos casos, puesto que la eliminación o almacenamiento de residuos de yeso supone un coste de gestión elevado, el reciclaje de yeso se convierte en una alternativa muy atractiva, tanto por facilitar la gestión de residuos como por aprovechar un material cuya explotación, aunque abundante, es limitada.

## 2.3. Escayola y reciclaje

Los residuos de placa de yeso son de los pocos RCD (residuos de construcción y demolición) que son reciclables de manera indefinida. Esto es posible debido a sus reacciones químicas de hidratación, y a propiedades como el fraguado, que serán definidos con detalle a continuación.

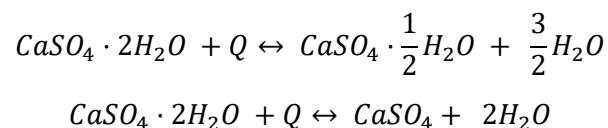
### 2.3.1. Reacciones del yeso en la naturaleza

Debido a su composición química, el yeso es un material que puede ser reciclado infinitas veces sin alterar sus propiedades.

Existen dos reacciones fundamentales para entender el ciclo de reciclaje del yeso, y por qué es infinito: la deshidratación y la rehidratación.

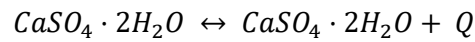
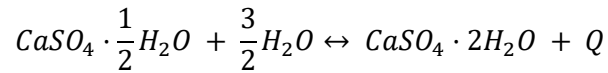
#### a) Deshidratación

Aplicando calor al yeso dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), este pierde agua y se transforma en hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) o anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ):



b) Rehidratación

El hemihidrato y algunas anhidritas, en combinación con agua, tienen la capacidad de fraguar, quedando yeso dihidratado (su estado original):



Ambas reacciones son reversibles, y se dan de forma natural en la formación de cristales de yeso. La velocidad y equilibrio de la reacción dependerá del tipo de atmósfera, si es seca o humedad, y de ello dependerá también el tamaño de los cristales. Podemos distinguir entre cristales tipo Alfa, si la atmósfera es húmeda, y tipo Beta si es seca.

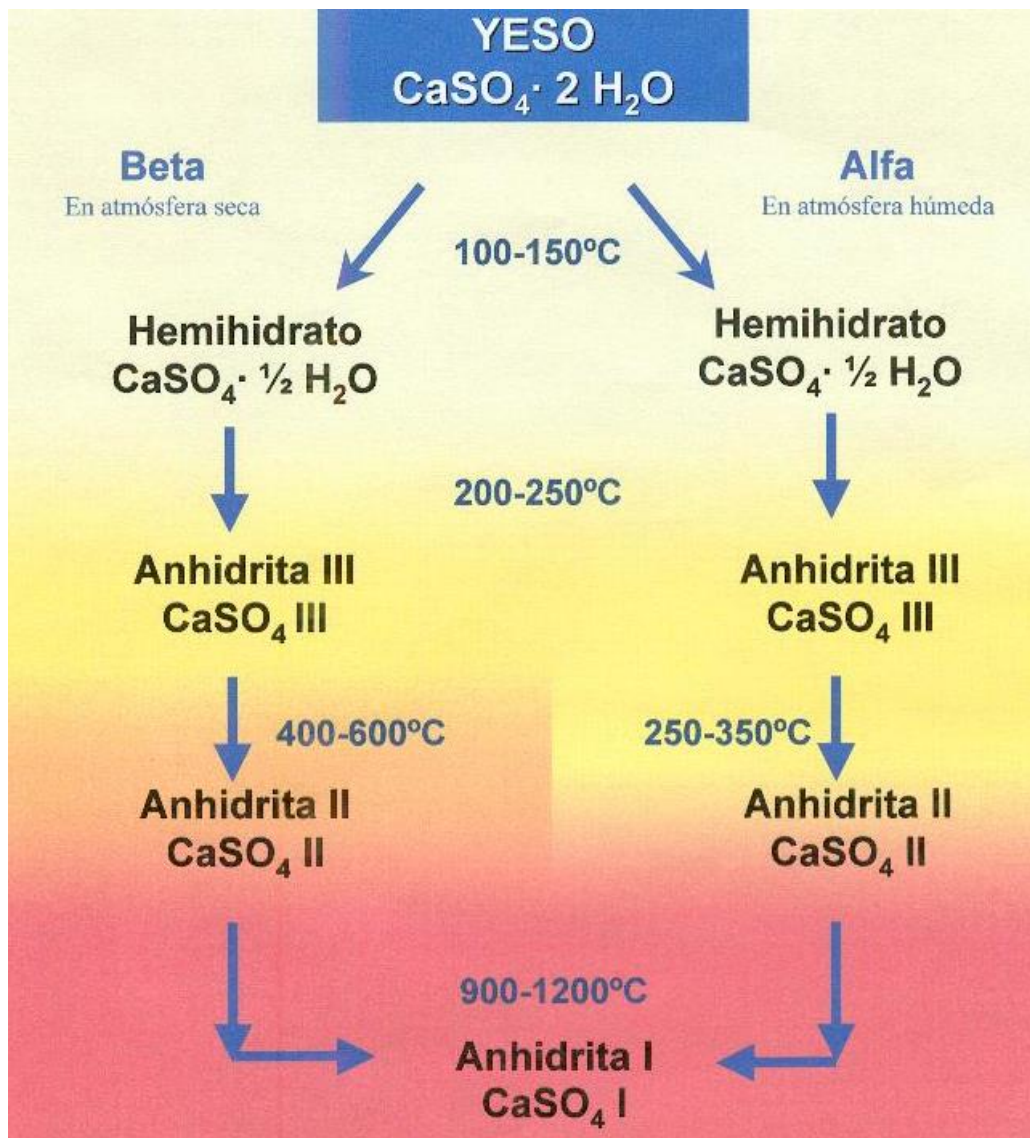


Figura 2.8. Ciclo de formación del yeso en la naturaleza.

Los cristales Alfa se mojan mejor y, por tanto, necesitan una menor relación de agua/yeso en el amasado. Esto se debe a que la superficie específica de los Alfa es mucho menor que la de los cristales beta. Estos yesos alfa son mucho más duros, así que se utilizan en aplicaciones como moldes para cerámica, odontología, etc.

### 2.3.2. Reacciones del yeso en la industria

Para la fabricación de los productos de yeso utilizados en la construcción, estas reacciones se producen de forma artificial.

MATERIAL DE PARTIDA		MINERAL DE YESO (ALGEZ) (YESO CRUDO, DIHIDRATO)		
DESHIDRATACION		CALDERAS HORNOS ROTATORIOS Y OTROS	CALCINACION EN HORNOS DE CAMARAS Y OTROS	HORNOS VERTICALES
PRODUCTOS TECNICOS		YESO DE MOLDEO	YESO DE ENLUCIDOS	YESO DE REVOQUE YESO-MARMOL
ESCALA DE HIDRATOS		100% → 100% → 100%		
<100°	DIHIDRATO			
>120°	α-, β- HEMIHDRATO	■	■	
>200°	α-, β- ANHIDRITA III	■	■	
400/800°	ANHIDRITA II		■	■
<1200°	ANHIDRITA I			■
HIDRATACION		SIN ACELERADORES		
DEL DIHIDRATO (SIN ESCALONES INTERMEDIOS)		RAPIDO	LENTO	MUY LENTO
POST-HIDRATACION		RETARDADO P.G. CON ALBUMINA ACELERADO P.G. CON DIHIDRATO		
		CON EXPANSION (1 A 3mm/m)		
		NO	SENSIBLEMENTE PERO SIN SER PERJUDICIAL	

Figura 2.9. Tipos de yesos formados en la industria, en función de la temperatura de reacción y del tipo de aparato empleado.

Dependiendo del tipo de yeso que queramos obtener, de mayor calidad o diferentes propiedades, utilizamos diferentes hornos para llevar a cabo la reacción de deshidratación. Estos nos permitirán conseguir diferentes presiones, atmósferas y temperaturas, que darán lugar a diferentes composiciones químicas del yeso.

La deshidratación del sulfato de calcio o piedra de yeso se lleva a cabo en hornos, obteniendo el llamado yeso de moldeo, compuesto principalmente por hemihidrato con estructura Beta. Tradicionalmente se usaba en revoques de estuco, aunque en la actualidad se emplea para la fabricación de piezas, como placas de yeso, o como aditivo para morteros de cal.

Cuando se precisa un yeso de moldeo de mayor calidad se utiliza un recipiente metálico de paredes gruesas y cierre hermético llamado autoclave. El autoclave permite llevar a cabo la reacción de cocción del mineral con vapor de agua, que alcanza temperaturas superiores a

los 100°C debido a la alta presión del interior del recipiente. Estos yesos están compuestos principalmente por hemihidrato con estructura Alfa.

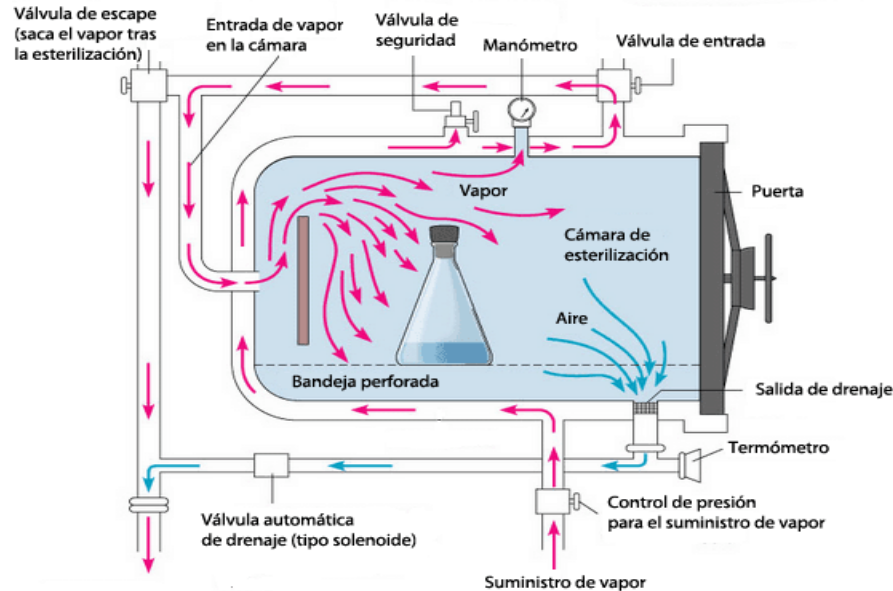


Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de una autoclave.

Los yesos que se usan para enlucidos interiores de edificios, llamados yesos de enlucidos, se obtienen en los hornos de cámaras o de pisos, donde la cocción se produce por transmisión directa de calor del piso refractario, es decir, por radiación.

Los yesos para enfoscados y revoques se fabrican en los hornos verticales. Con tratamiento previo también se obtiene el yeso de mármol.

Si hablamos de la composición química del yeso calcinado, podemos decir que está depende, por un lado, del aparato donde se realiza la deshidratación, y por otro, de la temperatura a la que se lleva a cabo la reacción, aunque al final, estos parámetros (temperatura e instrumentación) dependen el uno del otro.

Al combinar con agua estos productos fabricados (yeso de moldeo, de enlucidos, etc.) para su amasado, se forma en todos ellos el hidrato doble, sin distinción. Esta reacción de agua y yeso se llama hidratación. Las anhidritas naturales y las sintéticas (procedentes de residuos industriales) requieren activadores para su hidratación. Los yesos de calcinación y los enlucidos no necesitan activador para la hidratación. En estos últimos, el contenido en yeso natural (hidrato doble) actúa como activador de la cristalización.

La velocidad de hidratación varía según el contenido del yeso. Cuanta más anhidrita tenga más tiempo tardará la reacción. En los yesos de moldeo, cuyo contenido principal es hemihidrato, la hidratación es rápida, generalmente 30 minutos. Este tiempo aumenta en los yesos de enlucido, y es aún más lenta para los yesos de revoque.

La velocidad de la reacción de hidratación se puede regular: mediante el uso de retardantes, si se busca retrasar; o añadiendo yeso dihidratado, si se quiere acelerar.



Estas reacciones químicas son reversibles, y es lo que hace posible un reciclaje infinito del yeso, pudiendo calcinarse los residuos de yeso, para después hidratarlos en el amasado y obtener los distintos tipos de yeso reciclado como productos industriales.

### 2.3.3. Iniciativas de reciclaje de yeso

En la actualidad, existen varias iniciativas para fomentar la reutilización y reciclaje de yeso, en la búsqueda de un modelo de fabricación sostenible.

Eurogypsum es la federación europea que representa a la industria de fabricación de productos de yeso. Su principal objetivo es promover un entorno construido sostenible para Europa a través de los beneficios ambientales, sociales y económicos del yeso. Su proyecto “Gypsum to Gypsum Life +” es el primer paso hacia la economía circular del yeso: un proyecto europeo de colaboración entre la industria del reciclaje, el sector de la demolición y la industria del yeso. Su objetivo es la reutilización del polvo de yeso reciclado en el proceso de producción.



Figura 2.11. Ciclo de reciclaje del yeso por la empresa Placo Saint-Gobain.

IRCOW, un proyecto financiado por la Comisión Europea, ha desarrollado un sistema de tratamiento de residuos capaz de detectar partículas de una determinada naturaleza, como el yeso, y separarlas del resto de residuos.

Estas investigaciones fueron desarrolladas en una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición de Euskadi, en Ortuella, donde este sistema ya está implementado. Este sistema de detección de yeso se basa en infrarrojos, y según los datos de la planta BTB, la pureza del yeso recuperado es superior al 80%.

En España, la multinacional francesa Placo Saint-Gobain es una de las empresas que apuesta por soluciones sostenibles para la edificación, en la búsqueda del equilibrio social, económico y medioambiental. Placo ofrece un servicio de reciclaje de placas de yeso laminado desde 2014 (ver Figura 2.11). Estos residuos son reintroducidos como materia prima en el proceso productivo, evitando su almacenamiento (y posterior eliminación) en vertederos.

En 2018, un grupo de científicos del Laboratorio Nacional de Química de Pune y del Instituto de Tecnología Química de Bombay han desarrollado una técnica para reciclar los residuos de escayola procedentes de hospitales y clínicas. Conocido como “yeso de París”, debido a las explotaciones parisinas, la práctica habitual en el sector sanitario es la eliminación de los residuos hospitalarios mediante incineración, proceso muy contaminante para el medio ambiente. Esto se justifica debido a la presencia de bacterias en los moldes, considerándolo un material peligroso. La solución que propone el estudio es la desintegración de los residuos mediante una solución de bicarbonato de amonio, para obtener productos no peligrosos como el sulfato de amonio y lodos de carbonato de calcio. El sulfato de amonio es un producto muy utilizado como fertilizante químico en el sector agrícola, mientras que el carbonato de calcio se utiliza como aditivo en el sector construcción, lo que agrega valor al proceso.

Estos proyectos son algunos ejemplos de las posibilidades de reciclado de productos con yeso. Con este Trabajo de Fin de Grado, además de aprender más sobre este tipo de material, pretendemos aportar nuestro granito de arena a este campo.

## Capítulo 3. Materiales y métodos

### 3.1. El residuo de placas de escayola

Para realizar este Trabajo de Fin de Grado, hemos seleccionado residuos de escayola procedentes de placas de falso techo. Las placas que se ven en la Figura 3.1 han sido obtenidas en un contenedor de obra en Almería, en el año 2019. Se trajeron a la nave de Ingeniería de la Universidad de Almería, y allí se guardaron a temperatura ambiente hasta la puesta en marcha del proyecto.



*Figura 3.1. Residuos de placas de escayola utilizadas en este Trabajo de Fin de Grado.*

En el lateral de la placa, se encuentra el identificativo del fabricante (Figura 3.2). Estas placas fueron fabricadas por una empresa de Jaén, Escayescos S.L. En su web, podemos encontrar nuestras placas en su catálogo, por la referencia “techo desmontable fisurado”. Aparte del dibujo de la placa, como información técnica solo encontramos sus medidas y sus certificados, AENOR y marcado CE.

Al romper la placa descubrimos que, además de escayola, contiene fibra de vidrio. El refuerzo de vidrio se sitúa sobre todo en los bordes y los nervios de las placas, como se ve en la Figura 3.3, que es donde el espesor de yeso es también mayor. La mezcla de materiales distintos normalmente dificulta su reciclado, debido a que el material minoritario va quedando como impureza en el producto reciclado.

En este momento se plantean dos líneas de reciclado en paralelo: por un lado apartar la fibra y reciclar la escayola sola; y por otro reciclar todo junto. Separar la escayola de la fibra requiere un sistema de tratamiento de residuos especializado, por lo que al final se opta por la opción de reciclar todo junto.





**Figura 3.2. Identificativo del fabricante en el lateral de una de las placas de escayola.**



**Figura 3.3. Presencia y distribución de la fibra de vidrio en las placas.**

## **3.2. Molienda del residuo**

Para proceder al reciclado de las placas de escayola debemos triturar el residuo para sacar un material en polvo rico en yeso que pueda ser utilizado de nuevo como material de construcción. Esto es así debido a que, como hemos visto, la composición química básica del yeso no varía, únicamente cambia su contenido en humedad, el cual se controla con tratamientos de secado que veremos si es necesario aplicar tras la molienda.

Al no disponer la universidad de un molino triturador, en este TFG se ha molido de forma manual usando los siguientes materiales y procedimientos.

### **MATERIALES**

- Mazo de goma
- Espátula
- Pala de plástico
- Espuerta de goma
- Mortero de vidrio
- Botes de vidrio y plástico
- Tamiz con luz 0,4 mm
- Material de laboratorio (cuchara, bandeja, brocha)

### **PROCEDIMIENTO**

La molienda manual se realiza siguiendo estos pasos:

- 1) Sobre la espuerta, partimos la placa de escayola mediante golpes con el mazo de goma (Figura 3.4). En estas primeras fracturas se aprecia que salen muchas partículas finas de yeso.
- 2) Una vez fraccionada la placa para que quepa en la espuerta de goma, se procede a golpear los trozos más pequeños con el mazo de goma, buscando reducir el tamaño de los trozos más grandes para homogeneizar la molienda resultante (ver Figura 3.5).
- 3) Llega un momento en que debido a la acumulación de fino y a que el tamaño de los trozos grandes ya ha disminuido bastante, no se aprecia diferencia en el resultado (Figura 3.6). Entonces, con ayuda de la pala se vierte el residuo molido en una bandeja para su pesado y posterior almacenado en tarros de vidrio y plástico cerrados.



***Figura 3.4. Primera fase del proceso de molienda.***



***Figura 3.5. Resultado final de la molienda de basto.***

Una vez almacenado el residuo molido de una de las placas, se empieza de nuevo el proceso con otra placa. Para la realización de este trabajo se molieron alrededor de 10

placas de escayola, invirtiendo aproximadamente un tiempo de 30 horas en conseguir unos 6 kg del molido que se ve en la Figura 3.6, que vamos a llamar “molido basto”.

A partir de esta primera molienda se realizó una segunda para obtener una mayor cantidad de fino. Al residuo que se le ha aplicado esta segunda molienda lo llamaremos “molido fino”. La metodología para sacar el molido fino consistió en los siguientes pasos (Figura 3.6):

- 1) Con ayuda de la pala se echa un poco de molido basto en el tamiz de 0,4 mm y se realiza el tamizado mediante vibración.
- 2) Una vez finalizado el tamizado, se recupera del tamiz ciego con ayuda de una brocha el “molido fino”, y se guarda en botes de vidrio con cierre hermético. No hay trozos de fibra de vidrio visibles en el molido recuperado, lo cual significa que no pasan por el tamiz 0,4 mm. Es de esperar que en nuestro molido fino no haya cantidades importantes de fibra de vidrio, será principalmente yeso, pero en este TFG no hemos llegado a comprobar si esto es así por falta de tiempo.
- 3) El retenido en el tamiz se vuelca en un mortero de vidrio, y se realiza la molienda fina con la masa del mortero, vidrio contra vidrio.
- 4) Una vez que no se aprecia a simple vista una mejora en la reducción del tamaño de grano se da por terminada la molienda fina. Se vuelca el resultado en el tamiz y se repiten los pasos 1 y 2 para seleccionar como molido fino únicamente lo que pasa por el tamiz de 0,4 mm.

La molienda de fino llevó unas 60 horas aproximadamente, por lo laborioso del proceso y el volumen de fino necesario para realizar los ensayos de caracterización y la elaboración de las probetas.



**Figura 3.6. Materiales utilizados en la molienda de fino.**



### 3.3. Determinación de la humedad mediante secado en estufa según UNE 103-300

A fin de realizar una correcta caracterización de la molienda, primero se ha realizado un ensayo de determinación de la humedad ambiente con la que nos llega el residuo. Además, la norma de granulometría aconseja su realización previa.

#### MATERIALES

- Bandejas de plástico
- Desecador

#### INSTRUMENTACIÓN

- Estufa de secado ARGO LAB TCF50 Plus
- Balanza digital BOECO, precisión 0,01 g.



*Figura 3.7. Estufa de secado ARGO LAB TCF 50 Plus, utilizada en el laboratorio de materiales de la UAL.*

#### PROCEDIMIENTO

Cada norma que requiera una determinación de la humedad indica la masa de suelo necesaria para el ensayo. En caso de no ser así, esta norma facilita unos intervalos para ayudar a seleccionar la muestra de ensayo que se pueden ver en la tabla de la Figura 3.8.

Tamaño máximo de partícula Tamiz según Norma UNE 7-050	Masa mínima de muestra g
400 $\mu\text{m}$	30
5,0 mm	300
12,50 mm	900
25,0 mm	1 500
50,0 mm	3 000
80,0 mm	5 000
100,0 mm	7 000

**Figura 3.8. Masa mínima de la muestra en función del tamaño máximo de partícula según la norma UNE 103 300.**

En nuestro caso se tomaron unos 10 gramos de molido fino para hacer estos ensayos con el siguiente procedimiento:

- 1) Se coge un recipiente limpio y seco para pesar que no pierda masa a la temperatura a la que se va a realizar el secado de la muestra, y se determina su masa. Esta masa será  $M_1$ .
- 2) Se coloca la muestra en el recipiente, y se determina la masa conjunta recipiente + muestra. Esta masa será  $M_2$ .
- 3) Introducimos el recipiente con la muestra en la estufa a la temperatura de secado y ponemos en marcha el cronómetro para medir el tiempo. Para yesos esta temperatura no debe ser superior a 60 °C según la norma, así que fijamos la temperatura de secado en 60 °C.
- 4) Transcurrido el tiempo deseado, se extrae el recipiente con la muestra de la estufa y se deja enfriar unos minutos en el desecador hasta temperatura ambiente. Una vez frío, se determina la masa del conjunto que denominaremos  $M_3$ .

Siguiendo las recomendaciones de la norma, las mediciones de masa se tomaron a los siguientes tiempos desde el inicio del secado: una hora, tres horas, cinco horas, veinticuatro horas (un día), setenta y dos horas (3 días), noventa y seis horas (4 días).

El ensayo se repite tres veces para tres muestras independientes de molido fino.

## OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Conforme a la norma, el resultado se expresa en tanto por ciento y con una cifra decimal, y se determina mediante la expresión:

$$W = \frac{M_2 - M_1}{M_3 - M_1} \times 100$$

Donde

- **W** es el porcentaje de humedad;
- **M<sub>1</sub>** es la masa del recipiente de medida utilizado, en gramos;
- **M<sub>2</sub>** es la masa del recipiente + la masa inicial de la muestra, en gramos;
- **M<sub>3</sub>** es la masa del recipiente + la masa final de la muestra, en gramos.

Como se han realizado tres experimentos, se calculará el promedio de las tres, y ese será el resultado final, estimando la incertidumbre asociada como el error cuadrático medio.

### 3.4. Análisis granulométrico de suelos por tamizado según UNE 103 101

Este análisis tiene por objeto determinar la distribución de tamaños de partícula que tiene un sistema material disperso como es el granulado de yeso recuperado de las placas de escayola desechadas. Para hacer la granulometría utilizaremos una norma desarrollada de forma general para suelos en la que se utilizan una serie de tamices con diferentes aperturas (o luces), donde se irán quedando retenidas las partículas según su tamaño. El resultado final de la granulometría nos dará el tamaño medio de grano, el tamaño de grano más probable y la anchura de la distribución de tamaños de grano. Esto nos permite identificar las características de cada una de las moliendas hechas en este trabajo.

#### MATERIALES

- Juego de tamices de 203 mm de diámetro de la marca CONTROLS, con malla cuadrada de alambre, fabricados en acero, con las siguientes aperturas (luces) en mm: 2,000; 1,000; 0,400; 0,200; 0,125 y 0,080.
- Regla milimetrada
- Lámina de plástico
- Bandejas de plástico
- Espátula
- Brocha
- Recipiente de goma

#### INSTRUMENTACIÓN

- Balanza marca BOECO de 0,01 g.

## PROCEDIMIENTO

La norma del yeso (UNE-EN 13279) dice que antes de realizar los ensayos, la muestra de yeso debe homogeneizarse y extraerse una muestra representativa del material disgregado mediante cuarteo. El cuarteo se realiza en las siguientes etapas:

- 1- Se remueve la escayola y se extrae con ayuda de la pala una muestra de unos 500 gramos aproximadamente.
- 2- Se vierte la muestra de residuo molido sobre una lámina de plástico haciendo un cono.
- 3- Aplanamos la parte superior con la espátula para que quede un cono truncado (como un flan al desmoldarlo sobre un plato).
- 4- Con la misma espátula realizamos una cruz para dividir el cono en cuatro partes lo más iguales posibles y se separan claramente esas cuatro partes.
- 5- Con ayuda de la pala, recogemos y mezclamos las dos partes enfrentadas para obtener una primera fracción de la muestra, y mezclando las dos que quedan en el plástico se obtiene la segunda fracción de la muestra lista para el ensayo.

De las fracciones obtenidas, utilizaremos aproximadamente 180 g para el tamizado.



**Figura 3.9. Balanza BOECO de sensibilidad 0,01 g del laboratorio de materiales, utilizada para realizar los ensayos de granulometría.**

Vamos a utilizar una columna de tamices de la norma UNE 7 050-2: 2; 1; 0,400; 0,200; 0,125 y 0,080 mm, además del ciego. Preparamos y pesamos unas bandejas de plástico, una por cada tamiz, para poder pesar después lo retenido en cada tamiz.



El tamizado se realiza de forma manual. Colocamos sobre la poyata la columna de tamices ordenados con luces crecientes en tamaño desde abajo hacia arriba y echamos la muestra de residuo molido por la parte superior.



**Figura 3.10. Juego de tamices marca CONTROLS usados para la granulometría.**

Se realizan movimientos circulares con toda la columna hasta que se ve que el material retenido en el primer tamiz (de 2 mm) tiene una granulometría bastante homogénea y que ya no hay partículas que puedan atravesar la luz de ese tamiz.

Entonces quitamos este tamiz de la columna y, colocando la bandejita de plástico sobre un papel satinado que nos permita recuperar el material que se salga, volcamos el retenido en el tamiz en una de las bandejas de plástico previamente pesadas. Si hay partículas atrapadas en la malla del tamiz hay que recuperarlas dándole golpecitos con una brocha suave para ponerlas junto al retenido del tamiz.



**Figura 3.11. Muestras retenidas en cada uno de los tamices recuperadas en bandejitas de plástico para pesar durante la realización de la granulometría.**

Repetimos el proceso para cada uno de los tamices, hasta que no queden tamices en la columna y todos los retenidos se encuentren recuperados en las bandejitas de plástico (Figura 3.11). Cuando el tamaño de partícula se va haciendo más fino es más difícil hacer que el material pase por la luz del tamiz. En estos casos nos hemos ayudado de una brocha para hacer pasar el yeso más fino y también para recuperar luego el retenido.

Una vez terminado el tamizado, pesamos las bandejas con las muestras y por diferencia de pesadas ya tenemos las masas de retenido con las que se hará la granulometría.

## OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez se tienen las masas retenidas para la serie de tamices utilizada, se construye la función distribución de tamaños fraccionaria (retenidos por cada intervalo de tamaños) y acumulativa (suma de lo retenido hasta cierto tamaño).

Los intervalos de tamaño se toman según las aperturas de los tamices usados en la columna. Para fijar un límite superior de tamaños de partícula seleccionamos un trocito de los más grandes del retenido en el tamiz de 2 mm y lo medimos (ver Figura 3.12). Para el límite inferior, se recomienda usar 10 micras.



**Figura 3.12. Partícula de mayor tamaño retenida en el tamiz superior.**

A partir de las gráficas y tablas de las funciones distribución de tamaños se obtendrán los parámetros que caracterizan la granulometría de nuestra molienda, como son el tamaño medio de partícula, el tamaño más probable y la anchura de la distribución de tamaños.

El tamaño medio de partícula corresponde con el percentil 50 de la función acumulativa, que gráficamente será el tamaño de partícula correspondiente al 50% de la acumulativa. El tamaño de partícula más probable será el tamaño medio del intervalo que tenga más masa retenida en la función distribución fraccionaria. Y la anchura de la distribución será el rango de tamaños que haya entre el percentil 10 y el 90 de la acumulativa, o lo que es lo mismo la

diferencia entre el tamaño correspondiente al 10% de acumulado y el 90% de acumulado en la gráfica de la acumulativa.

El error que se comete con una granulometría por tamizado para partículas del orden o por debajo de 100 micras (0,100 mm) es muy elevado, si no se utiliza un fluido para ayudar a que las partículas atraviesen los tamices. Debido a la gran variabilidad de tamaños de partícula que puede contener la escayola molida, hubiera sido recomendable hacer una granulometría más específica para partículas en el rango de tamaños de las micras (entre 1 y 100 micras), mediante sedimentación o microscopía, pero por falta de tiempo no se ha realizado. De todos modos, cuando veamos los resultados veremos que nuestro residuo tiene principalmente agregados de escayola de tamaños superiores a 80 micras (0,080 mm).

### **3.5. Determinación de la relación agua/yeso según norma UNE-EN 13279-2**

La relación agua/yeso (R) es clave para las propiedades que va a tener cualquier producto fabricado con yeso o escayola, como hemos visto en la revisión bibliográfica. Por ello, hay una norma específica para determinar la R óptima para cada tipo de conglomerante basado en yeso. En nuestro caso además queremos variar esta relación dentro de unos márgenes que vamos a estimar aplicando esta norma.

La norma contempla tres métodos de ensayo para la determinación de R, de los que se han hecho los dos siguientes. La escayola reciclada que se ha usado para hacer estos ensayos ha sido la molida fina.

#### **3.5.1. Método de amasado a saturación**

Este método se utiliza para determinar la relación agua/yeso en los conglomerantes a base de yeso.

##### **MATERIALES**

- Recipiente cilíndrico de vidrio, con 66 mm de diámetro interior y 66 mm de altura, con marcas a los 16 mm y a los 32 mm de altura sobre la superficie interior de la base

##### **INSTRUMENTACIÓN**

- Cronómetro
- Balanza marca BOECO de 0,01 g



**Figura 3.13. Materiales de laboratorio para realizar los ensayos de determinación de la relación agua/yeso.**

## PROCEDIMIENTO

Antes de comenzar el ensayo, debemos hacer algunos preparativos. Primero, se determina la masa ( $m_0$ ) del recipiente, llenado previamente con 100 g de agua destilada. A continuación, preparamos un recipiente con una cantidad de yeso suficiente para realizar el ensayo (con 500 g habrá suficiente). Por último, preparamos el cronómetro, que utilizaremos para controlar el tiempo del ensayo. Este no debe exceder de 120 segundos. Ya podemos comenzar.

Se activa el cronómetro y se empieza a espolvorear yeso de forma uniforme sobre el recipiente con agua destilada, de forma que a los 30 segundos la pasta de yeso alcance la primera marca, y a los 60 segundos se alcance la segunda. Se sigue espolvoreando hasta que a los  $90 \pm 10$  segundos, la pasta alcance unos 2 mm por debajo de la superficie del agua. Durante los 20 segundos siguientes, se espolvorea yeso suficiente para que la capa de agua desaparezca.

Se elimina el exceso de pasta de yeso de los bordes del recipiente, y se determina la masa de este ( $m_1$ ). Repetimos el ensayo una segunda vez.

## OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Calculamos la cantidad de yeso espolvoreada en cada ensayo:  $m_1 - m_0$ , y calculamos el valor medio de los dos ensayos.

La relación agua/yeso (R) se determina dividiendo los 100 gramos de agua entre el promedio de yeso espolvoreado:

$$R = \frac{100}{m_1 - m_0}$$

donde

- $m_0$  es la masa del vaso + la masa del agua en gramos;
- $m_1$  es la masa del vaso + la masa del agua + la masa del yeso en gramos.

La estimación de la incertidumbre se realiza por propagación de errores aplicando la teoría de medidas experimentales.

### 3.5.2. Método de la medida de la fluidez de la pasta

Este ensayo se utiliza para los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso.

#### MATERIALES

- Recipiente de amasado
- Espátula
- Vaso de precipitado
- Molde de caucho duro de 40 mm de altura, 65 mm de diámetro interno superior y 75 mm de diámetro interno inferior
- Placa plana y lisa de vidrio
- Cronómetro
- Regla de medida

#### INSTRUMENTACIÓN

- Balanza de precisión

#### PROCEDIMIENTO

Antes de realizar el ensayo, hay que preparar el yeso y el agua. Primero, se pesan 500 g de agua destilada, y se vierten en el recipiente de amasado. Después, se pesa la cantidad de yeso necesaria para esa cantidad de agua, determinada por ensayos previos. Una vez hecho esto, puede dar comienzo el ensayo.

Iniciamos el cronómetro. Se espolvorea toda la muestra de yeso en el recipiente de amasado durante 30 segundos, y se deja reposar la mezcla 60 segundos.

Se remueve con la espátula durante 30 segundos, describiendo 30 movimientos en forma de ocho.

Después, hay que dejar que la mezcla repose durante 30 segundos.

Repetimos el proceso de remover durante 30 segundos más, igual que la primera vez.

Ahora que la pasta de yeso está lista, colocamos el cono sobre la placa de vidrio, y lo rellenamos.

Con la ayuda de la espátula o de cualquier objeto plano, como un cuchillo o la regla, eliminamos la pasta sobrante, dando pasadas a ras del cono. El resultado final se muestra en la Figura 3.14.

Pasados 3 minutos y 15 segundos desde el comienzo del experimento, se separa el cono de la placa de vidrio. Al quitar el molde, la pasta se empieza a extender sobre la placa de vidrio formando una galleta.

Se mide el diámetro formado por la galleta de yeso en dos posiciones perpendiculares, y se determina el valor medio. Este valor debe estar entre 150 mm y 210 mm. En caso contrario, habrá que repetir el ensayo con mayor o menor cantidad de yeso, en función del resultado obtenido. Una vez el valor obtenido esté dentro del rango, se anota el valor de la masa de yeso necesaria para obtenerlo,  $m_2$ .



**Figura 3.14. Cono truncado relleno en el ensayo de fluidez de la pasta de yeso.**

## EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

La relación agua/yeso es el cociente entre la masa de agua inicial y la masa de yeso empleada para el ensayo ( $m_2$ ):

$$R = \frac{500}{m_2}$$

donde  $m_2$  es la masa de yeso empleada en el ensayo en gramos. La incertidumbre se calcula por propagación de errores instrumentales aplicando la teoría de medidas.

### **3.6. Determinación de los tiempos de fraguado según norma UNE-EN 13279-2**

#### **3.6.1. Método del cuchillo**

El principio de fraguado es el momento en el que la pasta pasa del estado líquido al estado plástico. En este ensayo, el tiempo de fraguado es el tiempo en que los bordes de una hendidura producida por la hoja de un cuchillo sobre la pasta de yeso dejan de acercarse.

#### **MATERIALES**

- Vaso de precipitado
- Recipiente de amasado
- Cuchillo
- Espátula
- Placas de vidrio
- Cronómetro

#### **INSTRUMENTOS**

- Balanza BOECO de precisión 0,01 g

## PROCEDIMIENTO

### a) Fabricación de la galleta de pasta de yeso

Partiendo de la relación agua/yeso determinada en los ensayos 3.5.1 (método de amasado a saturación) o 3.5.2 (método de la fluidez de la pasta), se prepara y se mezcla la pasta de yeso (el procedimiento de preparación de la pasta está descrito en el punto 3.5.2).

Se anota el tiempo que marca el cronómetro en el momento en que el yeso entra en contacto con el agua, al que llamaremos  $t_0$ .

Se vierte la pasta sobre las placas de vidrio, formando tres galletas de unos 100-120 mm de diámetro y unos 5 mm de espesor.

### b) Determinación del tiempo de principio de fraguado

Una vez formadas las galletas, tenemos que hacer cortes con el cuchillo (Figura 3.15), limpiándolo entre corte y corte. Se alcanza el principio de fraguado cuando los labios de la hendidura dejan de acercarse. Habrá que anotar el tiempo en el que se hizo ese corte, al que llamaremos  $t_1$ .



**Figura 3.15. Hendidura formada en la galleta al realizar cortes con un cuchillo para determinar el principio de fraguado.**



## EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

El tiempo de principio de fraguado  $t_i$  se calcula con la siguiente expresión:

$$t_i = t_1 - t_0$$

Donde

- $t_0$  es el instante en el que comienza el mezclado de la pasta de yeso en minutos
- $t_1$  es el instante en el que se hace el último corte a la galleta en minutos

## 3.7. Determinación de las propiedades mecánicas según norma UNE-EN 13279-2

Una vez obtenidos los resultados de todos los ensayos anteriores, ya podremos hacer una pasta de yeso a partir del residuo molido de las placas de escayola que sea adecuada para fabricar probetas del material reciclado a las que podemos hacerle los ensayos mecánicos según la norma del yeso. Vamos a describir en primer lugar como se hacen las probetas siguiendo la norma, y luego como se hacen los ensayos de flexión y compresión para determinar la calidad del producto obtenido.

### 3.7.1. Preparación de las probetas de ensayo

#### MATERIALES

- Vaso de precipitado
- Recipiente de amasado
- Espátula
- Cronómetro
- Molde de acero para probetas de 4x4x16 cm<sup>3</sup>
- Utensilios de laboratorio (bandejas, lija, trapo, brocha, etc.)

#### INSTRUMENTACIÓN

- Balanza de precisión BOECO con precisión 0,01 g.

## PROCEDIMIENTO

### a) Preparativos

Antes de comenzar la preparación de la mezcla, hubo que limpiar de óxido los moldes que se ven en la Figura 3.16. Para ello, se empleó un trapo con aceite, y una lija para zonas con más óxido. Una vez limpios, se engrasaron con aceite para facilitar el desmoldado.

Para la preparación de la pasta de yeso, se determinó la masa de yeso necesaria para rellenar la serie de tres probetas de cada molde, en función de la relación agua/yeso calculada en ensayos previos.



**Figura 3.16. Moldes para probetas de 40 mm x 40 mm x 160 mm empleados para hacer las probetas de escayola reciclada.**

### b) Preparación de las probetas

La preparación de la mezcla de yeso y agua, o amasado, se realizó siguiendo el proceso descrito en el punto 3.5.2 (método de fluidez de la pasta).

Una vez terminado el amasado, se vierte la mezcla en los moldes hasta rellenarlos por completo, con ayuda de la espátula. Una vez rellenos los moldes, se debe elevar el molde 10 mm desde su extremo superior y dejarlo caer, para evitar la aparición de burbujas de aire. Esta operación debe repetirse 5 veces.

El proceso de relleno debe ser inferior a 10 minutos desde el amasado. El exceso de yeso no debe ser eliminado hasta que haya fraguado, según el tiempo de fraguado determinado

en el ensayo correspondiente. En ese momento, se podrá quitar el exceso con una regla mediante un movimiento de sierra.



***Figura 3.17. Molde relleno de escayola reciclada para fabricar una serie de probetas para los ensayos mecánicos.***

### c) Desmoldado

Cuando la pasta tenga la consistencia suficiente, se podrá proceder a desmoldar las probetas. Este es el punto más crítico del proceso, pues un desmoldado temprano puede suponer la rotura de la probeta y tener que empezar de nuevo. Para comprobar la consistencia, he utilizado un palillo de dientes en los extremos de la probeta, de un modo similar al ensayo del cuchillo.

Afrojando el tornillo del molde, y con cuidado, se va levantando de forma que las probetas queden en la base. Es clave la lubricación del molde, que permitirá a la probeta salir sin sufrir fractura. Algunos moldes se pueden desmontar por piezas, aunque desde mi experiencia, es mejor hacer el desmolde completo (Figura 3.18).



**Figura 3.18. Desmoldado de las probetas de escayola reciclada.**

Una vez desmoldadas, se identifican las probetas, según su serie correspondiente y numeración dentro de ésta.

d) Secado

Las probetas se colocan sobre una rejilla metálica y se mantienen a temperatura ambiente del laboratorio durante una semana en el interior de un recipiente cerrado.



**Figura 3.19. Probetas durante el proceso de secado en el laboratorio.**

Pasado este tiempo, se secan en la estufa a 40°C hasta masa constante. En el caso de nuestras probetas, este tiempo fue 2-3 días, dependiendo de la serie. Cuando se sacan de la estufa, tanto para la realización de los ensayos mecánicos como para pesarlas, deben dejarse en el desecador hasta alcanzar la temperatura del laboratorio.

#### DOSIFICACIÓN Y NOMENCLATURA DE LAS PROBETAS

A raíz de los ensayos de caracterización, y de los resultados de los ensayos previos, se prepararon diferentes mezclas, con el objetivo de determinar la influencia de los parámetros ensayados en las propiedades mecánicas. Las probetas fabricadas, con su respectiva nomenclatura, se pueden ver en la Tabla 3.1.

La numeración de las probetas está compuesta por números y letras, que hacen referencia a cada tipo de escayola, a la relación agua/yeso “R” con la que se hizo la mezcla, y su posición en la serie.

La primera letra nos indica la procedencia de la escayola, pudiendo ser:

- C: escayola comercial. Estas series se fabricaron para probar los ensayos y servir como referencia de propiedades para las de reciclado. Esta escayola pertenece a la serie Indayola de la marca Yedesa, cuya ficha técnica se presenta en la Figura 3.20.
- B: molido basto o grueso.
- F: molido fino.

A continuación, tres números que nos van a indicar la relación agua/yeso que se empleó en esa serie. Por ejemplo, si la relación agua/yeso fue  $R = 0,54$ , la serie tendrá por números 054. Para la escayola comercial se hicieron dos series con la misma  $R = 0,74$ , así que en

este caso no aparece en el nombre de la muestra la relación agua yeso, sino un número que se usó para diferenciar a cada una de las dos series.

Por último, distinguimos las probetas de una misma serie identificando su posición en la misma. Cada serie se compone de 3 probetas, que han sido identificadas con las letras a,b y c.

**Tabla 3.1. Características y nomenclatura de las probetas de escayola estudiadas en este TFG.**

Tipo de yeso	R (%)	Nomenclatura Probetas
Yeso Comercial	74	C1a
		C1b
		C1c
		C2a
		C2b
		C2c
Reciclado Molido Basto	54	B054a
		B054b
		B054c
	74	B074a
		B074b
		B074c
	94	B094a
		B094b
		B094c
Reciclado Molido Fino	54	F054a
		F054b
		F054c
	74	F074a
		F074b
		F074c
	94	F094a
		F094b
		F094c



# INDAYOLA

## (ESCAYOLA)

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

<b>PRODUCTO:</b> .....	ESCAYOLA E - 35
<b>RETENIDO (tamiz 0.2)</b> .....	≤ 1,0 %
<b>AGUA COMBINADA</b> .....	< 7,0 %
<b>I. PUREZA</b> .....	> 92 %
Tiempos de Fraguado: Inicio fraguado mayor de 13 min y menor de 20 min Final de fraguado: entre 30-50 min	
<b>TRABAJABILIDAD</b> .....	>20 min
<b>RELACIÓN DE AMASADO (Kg/l)</b> .....	1,0-1,2Kg/ 1 l. Agua
<b>DENSIDAD APARENTE EN POLVO ( No compactado )</b> .....	550-650 Kg/m <sup>3</sup>
<b>FLEXIÓN</b> .....	> 3,5 N/mm <sup>2</sup>

#### **PROPIEDADES:**

INDAYOLA, es una escayola, sulfato cálcico hemihidrato  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , con elevada pureza y excelentes cualidades, elaborado con materia prima de alta calidad.

INDAYOLA, es un producto inofensivo, de origen totalmente natural.

Sus cualidades principales son:

- Incombustible y no produce gases tóxicos. (Clasificado M 0)
- Una vez fraguado contiene aproximadamente un 20 % de agua. Para su degradación por temperatura, es necesario un aporte térmico para la evaporación del agua combinada, así como para romper la estructura molecular, lo que representa una excelente barrera ante las llamas.
- Mal conductor del calor, lo que le confiere sus características como aislante térmico.
- Como material de construcción tradicional, tiene una extraordinaria capacidad de aislamiento acústico
- La escayola es un producto que aporta un eficaz comportamiento higrométrico, regulando la humedad ambiente y proporciona confort en aquellos lugares donde se encuentra.
- Frente a otros materiales de construcción más "fríos" y debido a su inercia térmica, transmite una sensación agradable de habitabilidad.

*Figura 3.20. Ficha técnica de la escayola comercial utilizada en este TFG.*

### **3.7.2. Determinación de la resistencia a flexión**

Las probetas se ensayaron a flexión en una nave del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Almería. Para ello, se utilizó una prensa de rotura a flexión marca IBERTEST modelo GL500 que se puede ver en la Figura 3.22. Este instrumento únicamente determina el valor de la carga de rotura a flexión y consta básicamente de una zona para colocar la probeta entre tres barras cilíndricas que serán los puntos de apoyo para aplicar la carga a flexión y en la parte superior una barra con una escala sobre la que se desplaza una pesa para aplicar la carga correspondiente.

Para realizar las medidas se desplaza el carrito móvil sobre la escala hasta el principio del recorrido para que no se esté aplicando ninguna carga. Después, colocamos la probeta a ensayar en el hueco entre las tres barras de apoyo, y ajustamos con el tornillo hasta que la probeta no se pueda mover. La carga a flexión se aplica en tres puntos, uno fijo a la parte inferior del soporte que no se mueve, y otros dos solidarios a la parte superior del soporte que se mueve hacia arriba aplicando la carga a flexión dependiendo del desplazamiento del carrito.

Una vez colocada la probeta y ajustadas las sujeciones, se pone en marcha la prensa con el interruptor de la izquierda. Hay que mantenerlo pulsado durante todo el recorrido. Conforme va avanzando el carrito por la guía, más fuerza ejerce sobre la probeta, hasta que ésta rompe.



**Figura 3.20. Prensa de flexión IBERTEST GL500 ubicada en la nave de Ingeniería de la UAL.**

La prensa no tiene parada automática, así que hay que estar atentos al “click” que hace la rotura para soltar el interruptor y así detenerla. En ese momento, anotamos la fuerza necesaria para provocar la rotura de la probeta para luego poder calcular la resistencia a la flexión.

El marcador de la prensa nos proporciona varias escalas (Figura 3.24), con diferentes magnitudes. Nosotros vamos a trabajar con la fuerza  $P$  en kg, que transformaremos en Newtons multiplicando por la gravedad. Según la norma, como mínimo necesitaremos tres valores de rotura, y hacer promedio de ellos para calcular la resistencia a flexión de un tipo de material.





**Figura 3.21. Probeta de escayola montada en el soporte y preparada para comenzar el ensayo de flexión.**



**Figura 3.22. Escalas de medida de la prensa IBERTEST GL500. El marcador de la carga aplicada se encuentra en el centro de la ventana rectangular, solidario a la pesa en forma de prisma que se desplaza a lo largo del brazo con la escala.**



**Figura 3.23. Probetas fracturadas tras el ensayo de flexión.**

Para calcular la tensión de rotura a flexión, utilizaremos la siguiente fórmula indicada en la norma:

$$\sigma = \frac{3}{2} \left( \frac{F L}{b d^2} \right)$$

donde

- $\sigma$  es la resistencia a flexión en N/mm<sup>2</sup>
- $F$  es la carga media de rotura en N de, al menos, tres valores obtenidos para cada material
- $L$  es la distancia de separación entre los rodillos de los extremos en la prensa ((107 ± 1) mm)
- $b$  es la base del molde utilizado ((40 ± 1) mm)
- $d$  es la altura del molde utilizado ((40 ± 1) mm)

La norma indica que el ensayo debe repetirse tres veces para obtener un valor promedio de la fuerza de rotura a flexión con el que calcular la resistencia a flexión para cada tipo de yeso. Como ya hemos dicho, se fabricarán series de tres probetas con distintas granulometrías y relaciones agua/yeso que es de esperar que den lugar a aglomerados de yeso con distintas propiedades mecánicas.

### **3.7.3. Determinación de la resistencia a compresión**

Una vez realizado el ensayo de flexión, cada probeta ha quedado dividida en dos trozos (ver Figura 3.23). Con cada uno de estos trozos, llevaremos a cabo el ensayo de compresión.

Para ello se utilizó una prensa IBERTEST que se encuentra en la misma nave Ingeniería de la Universidad de Almería. Esta prensa puede aplicar cargas de hasta 15 toneladas. Está automatizada y se controla con un ordenador mediante el software PCD2K (desarrollado por Servosis, Madrid), pudiendo variar la configuración de aplicación de la carga según el material a ensayar. Los datos son leídos mediante sondas, y vertidos en hojas de cálculo.



**Figura 3.24. Prensa de compresión IBERTEST de 15 toneladas ubicada en la nave de Ingeniería de la UAL.**

Los platos que aplican la tensión son circulares de unos 17 cm de diámetro, por lo que hace falta usar el adaptador que se ve en la Figura 3.27 en color azul para disminuir la sección en la que se aplica la carga, que para nuestras probetas es de 40 mm x 40 mm. La probeta se coloca entre los platos para aplicarle compresión como se ve en la Figura 3.28.

Una vez configurados los parámetros del ensayo en el ordenador, se coloca el trozo de probeta en el adaptador de 40 mm x 40 mm. Al pulsar el actuador, la prensa se desplaza hasta que la probeta queda encajada. Ya podemos iniciar el ensayo, pulsando el comando "inicio". El actuador comienza a ejercer presión en sentido vertical a velocidad constante de 0,1 mm/s, hasta que se produce la rotura. En ese momento, el programa detecta que el ensayo ha concluido y detiene el actuador, llevándolo hasta la posición de inicio. Las sondas han registrado todos los datos desde el inicio hasta el fin del ensayo. Estos datos se volcaron en hojas de cálculo, para analizarlos posteriormente.



**Figura 3.27. Detalle del adaptador de los platos de la prensa a una superficie cuadrada de 40 mm x 40 mm para ensayar probetas de esta sección.**



**Figura 3.28. Detalle de la probeta colocada para la realización del ensayo de compresión.**



Debido a que la prensa está orientada a probetas de hormigón, que tienen una resistencia a compresión superiores a 20 N/mm<sup>2</sup>, los valores de precarga que considera el programa son demasiado altos para las probetas de escayola, que previsiblemente tendrán una  $\sigma$  inferior a la precarga mínima permitida. Esto hizo necesario adaptar los parámetros de control del programa que maneja la prensa eliminando dicha precarga. En nuestro caso, el parámetro de control que utilizamos es la posición: al iniciar el ensayo, el programa detecta la posición inicial como 0 y a partir de ahí comienza a registrar el desplazamiento de la prensa y la fuerza necesaria hasta conseguir ese desplazamiento hasta que se detecta la rotura cuando se produce una bajada de esta fuerza.

Los resultados que da el programa son la fuerza a compresión, en kN, y la posición del plato, en mm, todo en función del tiempo de ensayo, en segundos. Además, proporciona el valor de la fuerza de rotura, en kN. Con ellos podemos calcular el valor de la resistencia a compresión, mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_{COMPRESIÓN} = \frac{F_C}{1600}$$

donde

- $\sigma_{COMPRESIÓN}$  es la resistencia a compresión en N/mm<sup>2</sup>;
- $F_C$  es la fuerza de rotura a compresión en N;
- 1600 es el área de la probeta, 40 mm x 40 mm, en mm<sup>2</sup>

La norma indica que hay que hacer al menos 6 medidas de la fuerza de rotura a compresión para determinar la resistencia a compresión de un tipo de yeso.

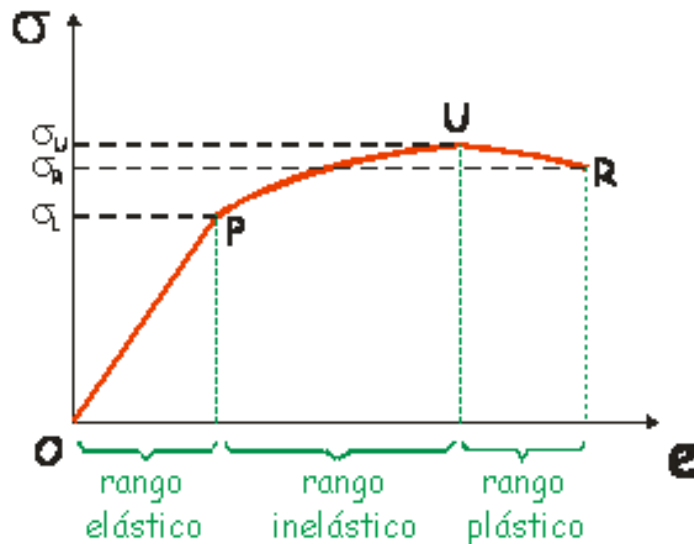
Además de esta resistencia, como tenemos la curva tensión-deformación completa podremos calcular el módulo elástico, como veremos directamente en el capítulo de resultados.



**Figura 3.29. Momento de la rotura de una probeta en el ensayo de compresión.**

La curva tensión-deformación, es una gráfica que nos presenta la relación entre la tensión a la que está sometido un material por la aplicación de una fuerza externa frente a la deformación que se produce. En la Figura 3.30 podemos observar una curva tensión-deformación típica. En ella podemos distinguir 3 zonas bien diferenciadas:

- El rango elástico (O-P): es la zona lineal de la curva, donde la relación entre tensión y deformación viene dada por la Ley de Hooke. El punto P nos indica la tensión máxima que se puede aplicar sobre el material sin que este deje de ser elástico, es decir, sin que la deformación sea permanente cuando cese el esfuerzo. La tensión  $\sigma_L$  se denomina "límite elástico".
- El rango inelástico (P-U): esta zona nos indica que los esfuerzos que actúan sobre el material producen en este deformaciones residuales o permanentes. La tensión  $\sigma_U$  se denomina "esfuerzo último".
- El rango plástico: en esta zona ocurre una deformación plástica del material, de manera que, aunque la intensidad del esfuerzo disminuya, la deformación del material aumenta. La tensión  $\sigma_R$  se denomina "esfuerzo de rotura" y es el esfuerzo que produce la rotura del material.



**Figura 3.30. Curva tensión-deformación típica donde se aprecian los distintos regímenes de deformación de materiales bajo niveles de tensión crecientes.**

La curva tensión-deformación de los materiales cerámicos, como es el yeso o escayola, solo suele tener el rango elástico debido a la elevada fragilidad que caracteriza a este tipo de materiales. Como veremos en las curvas a compresión registradas en este trabajo, la rotura de las probetas de yeso se produce antes de que se pierda la linealidad entre tensión y deformación, es decir, antes de entrar en plástica.



## Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos en este Trabajo Fin de Grado. Estos resultados se irán analizando y discutiendo conforme se vayan presentando para poder ir sacando las principales conclusiones de este trabajo experimental.

### 4.1. El residuo de escayola molido

En el Capítulo 3 se han descrito los procesos de molienda que han dado lugar al residuo de escayola molido que vamos a utilizar para ver sus posibilidades de reciclado en un nuevo material de construcción. Debido a las características del residuo se ha optado por realizar una molienda basta y una molienda fina, de modo que vamos a tener dos conjuntos de productos reciclados a partir de cada una de estas moliendas.

En la Figura 4.1 se puede ver el aspecto del molido basto y del molido fino. Para la realización de este trabajo se han utilizado aproximadamente 3 kg de molido grueso y otro tanto de molido fino. En este primer punto, vamos a presentar los resultados correspondientes a las características iniciales del residuo: la humedad inicial y la distribución granulométrica. En cada caso se irá indicando si el ensayo se hizo para el molido basto y para el grueso o solo para uno de ellos.



**Figura 4.1. Aspecto de la molienda gruesa (izquierda) y molienda fina (derecha). Los dos residuos recuperados son muy blancos, el color anaranjado de la molienda fina es un efecto de la iluminación.**



#### 4.1.1. Humedad inicial

Para calcular la humedad absorbida en el residuo se siguió la norma UNE 103-300-93, siguiendo el proceso descrito en el Capítulo 3. La norma dicta que el secado debe llevarse a cabo hasta que la masa sea constante. Se define como masa constante aquella en la que la diferencia entre dos pesadas sucesivas cada 24 horas es menor del 0,1 %. Este ensayo se realizó para el molido fino. Los datos tomados durante el ensayo se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Variación de la masa de tres muestras de molido fino con el tiempo de secado a 60 °C.**

Tiempo (h)	Muestra 1 (± 0,01 g)	Muestra 2 (± 0,01 g)	Muestra 3 (± 0,01 g)
0	10,32	10,19	10,37
1	10,32	10,19	10,37
3	10,32	10,18	10,36
5	10,31	10,18	10,36
24	10,31	10,17	10,35
72	10,30	10,16	10,35
96	10,30	10,16	10,35

Como se puede ver, las muestras estaban muy secas, aunque el yeso debe contener agua en la estructura que no se extrae a 60 °C. Para la masa de las muestras el 0,1 % equivale a 0,01 g. Se comprobó que la variación de masa desde los tres a los cuatro días es menor de este valor, por lo que todas las muestras alcanzaron masa constante tras 96 horas de secado.

Para calcular la humedad inicial en las muestras del residuo, utilizamos la siguiente fórmula:

$$W (\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} \times 100$$

tomando como  $M_1$  la masa del recipiente,  $M_2$  la masa inicial para  $t = 0$  h, y  $M_3$  la masa para  $t = 96$  h. Los resultados para cada muestra se recogen en la Tabla 4.2, aplicando los criterios de redondeo y con su estimación de incertidumbres.

**Tabla 4.2. Cálculo de la humedad inicial para las tres muestras ensayadas.**

Muestra	$M_1$ (g) (±0,01)	$M_2$ (g) (±0,01)	$M_3$ (g) (±0,01)	W (%) (±0,25)
Muestra 1	2,22	10,32	10,30	0,25
Muestra 2	2,08	10,19	10,16	0,37
Muestra 3	2,29	10,37	10,35	0,25
<b>Promedio:</b>				0,29 ± 0,04

El resultado definitivo será el promedio entre las tres medidas y como incertidumbre el error cuadrático medio de la serie de datos:

$$W = (0,29 \pm 0,04)\% w/w$$

Como vemos, en la tabla, al hacer la propagación de errores de  $W$ ,  $\Delta W$ , obtenemos una incertidumbre asociada a la determinación de este parámetro de 0,25%, del mismo orden de magnitud que la propia medida. Esto nos dice que deberíamos haber utilizado una balanza más precisa (de 0,001 g o mayor sensibilidad) para hacer este experimento. En cualquier caso, el error cuadrático medio de la pérdida de masa en las tres muestras está por debajo del 14% del valor de la medida, de modo que podemos asegurar que el material recuperado tras la molienda está muy seco. De acuerdo con estos resultados, no se realizó ningún secado adicional al yeso molido extraído de residuo de placas de escayola.

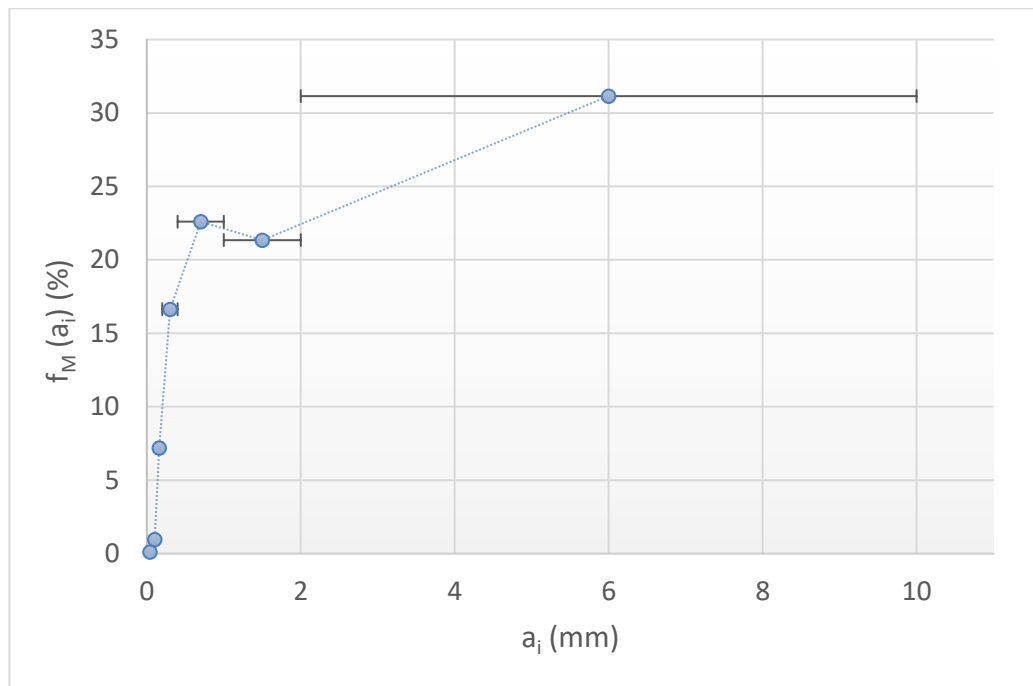
#### 4.1.2. Análisis granulométrico por tamizado

Para determinar la finura de la molienda, la norma del yeso indica la realización de un análisis por tamizado. En el Capítulo 3 se describió la metodología seguida en el ensayo, así como los materiales e instrumentos necesarios para llevarla a cabo. También se mostró que el tamaño máximo de partícula que se admite tras la molienda es de aproximadamente 1 cm (10 mm).

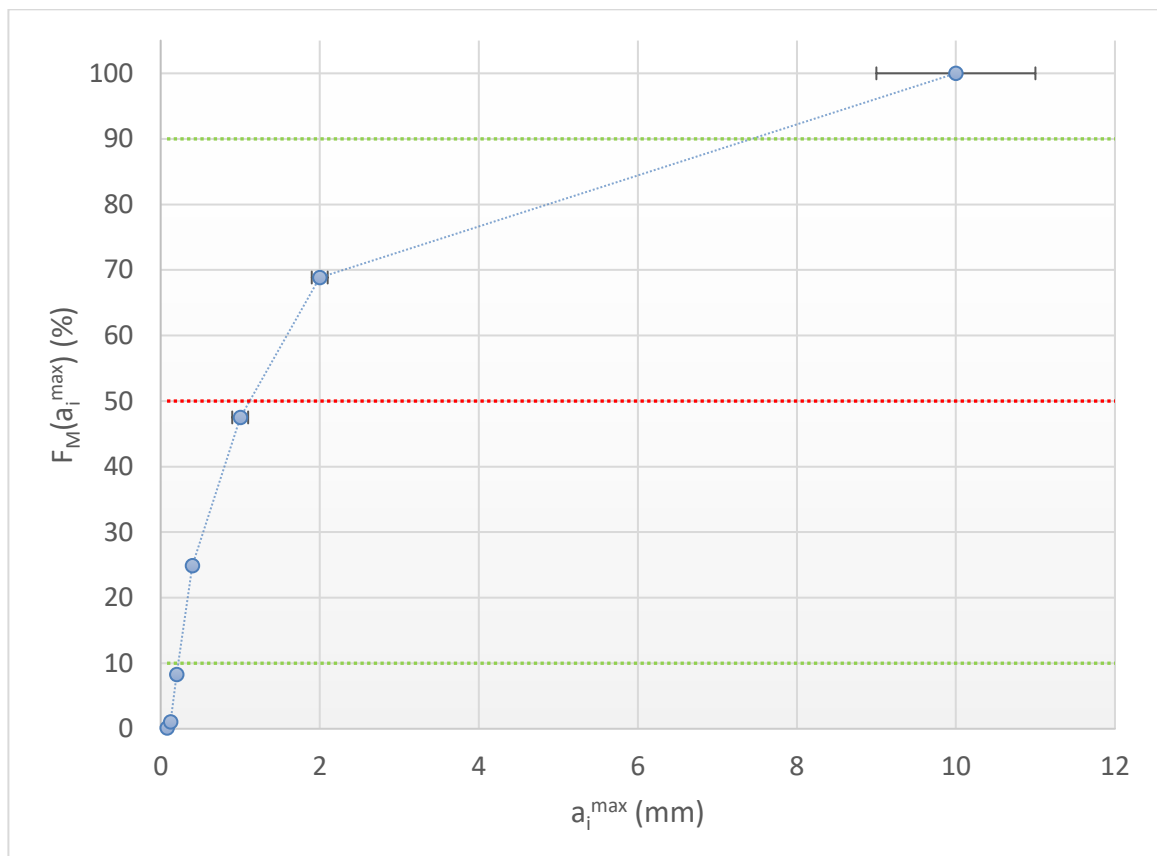
Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.3, y a partir de ellos se obtuvieron la gráficas de la granulometría (Figura 4.2 y 4.3).

**Tabla 4.3. Resultados de la granulometría del molido basto de residuos de escayola.**

Luz de tamiz (mm)	Representante intervalos de tamaños ( $a_i$ ) (mm)	Masa retenida fraccionaria ( $f_M(a_i)$ ) (g) ( $\pm 0,02$ )	Masa retenida fraccionaria ( $f_M(a_i)$ ) (%)	Tamaño mayor intervalos de tamaños ( $a_i^{\max}$ ) (mm)	Masa acumulada pequeños a grandes ( $F_M(a_i)$ ) (%)
2,0	$6 \pm 4$	56,45	$31,15 \pm 0,02$	$10 \pm 1$	$100,00 \pm 0,12$
1,0	$1,5 \pm 0,5$	38,69	$21,35 \pm 0,02$	$2,0 \pm 0,1$	$68,85 \pm 0,10$
0,40	$0,7 \pm 0,3$	40,95	$22,60 \pm 0,02$	$1,0 \pm 0,1$	$47,50 \pm 0,08$
0,20	$0,3 \pm 0,1$	30,16	$16,64 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,01$	$24,90 \pm 0,06$
0,125	$0,16 \pm 0,04$	13,03	$7,19 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,01$	$8,26 \pm 0,04$
0,080	$0,10 \pm 0,02$	1,76	$0,97 \pm 0,01$	$0,125 \pm 0,001$	$1,07 \pm 0,02$
Ciego	$0,05 \pm 0,04$	0,19	$0,10 \pm 0,01$	$0,080 \pm 0,001$	$0,10 \pm 0,01$



**Figura 4.2. Función distribución de tamaños fraccionaria ( $f_M(a_i)$ ) en porcentaje en masa obtenida en la granulometría del molido basto.**



**Figura 4.3. Función distribución de tamaños acumulativa ( $F_M(a_i)$ ) en porcentaje en masa obtenida en la granulometría del molido basto. El tamaño medio de la distribución se sitúa en el punto de corte de la curva con el 50% (línea roja horizontal) y la anchura de la distribución de tamaño entre el 10 y el 90% (líneas verdes horizontales).**

A partir de estos datos podemos sacar el tamaño medio, la anchura y el tamaño de grano más probable de nuestro molido basto. Los resultados están en la Tabla 4.4.



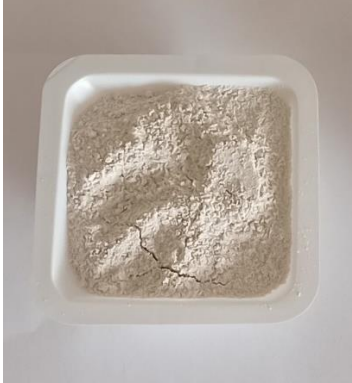
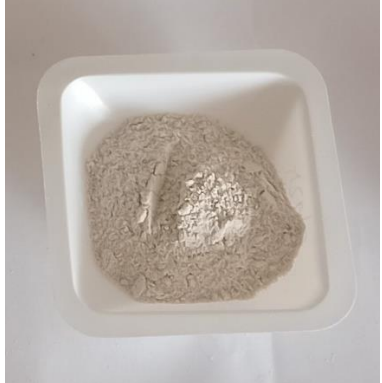


**Tabla 4.4. Tamaños característicos obtenidos de la granulometría del molido basto de residuos de escayola.**

	(mm)
<b>Tamaño medio (50%) (mm)</b>	1,1 ± 0,1
<b>Moda (mm)</b>	6 ± 4
<b>Anchura ((90-10) %)</b>	7 ± 3

Podemos observar que la molienda realizada inicialmente da una distribución de tamaños de anchura muy grande en comparación con la de los yesos comerciales, que suele tener tamaños medios inferiores a 100 micras (0,01 mm) y anchuras de la distribución por debajo de 0,2 mm. Vemos también que el tamaño de grano más probable es de 6 mm, que es el tamaño medio del retenido en el tamiz de 2 mm que supone más del 30 % de la masa de esta molienda. Entre los tamices 2 y 1 mm retienen aproximadamente el 50 % del granulado, como nos dice el valor de tamaño medio obtenido en la granulometría. El siguiente tamiz en importancia es el de 0,4 mm que retiene otro 20 % del total. Por tanto, tenemos que el 75 % de la masa del residuo basto es retenida por el tamiz de 0,4 mm, que solo deja pasar el 25 % de lo molido con mazo y espuerta de goma.

Además, si miramos el aspecto de lo retenido en el tamiz (ver Figura 4.4) observamos que la mayor parte de las partículas de escayola que contienen fibra de vidrio son retenidas en el tamiz de luz 2 mm, aunque algunas pasan este tamiz y también el de 1 mm hasta el tamiz 0,4 mm. En cambio, en el tamiz de 0,2 mm ya no tenemos restos visibles de fibra de vidrio.

Todas estas observaciones nos hicieron seleccionar el tamiz 0,4 mm para hacer una segunda molienda más fina del residuo de escayola, con el procedimiento que se ha explicado en el Capítulo 3.

	
Retenido en el tamiz 2 mm	Retenido en el tamiz 1 mm
	
Retenido en el tamiz 0,4 mm	Retenido en el tamiz 0,2 mm
	
Retenido en el tamiz 0,125 mm	Retenido en el tamiz 0,08 mm

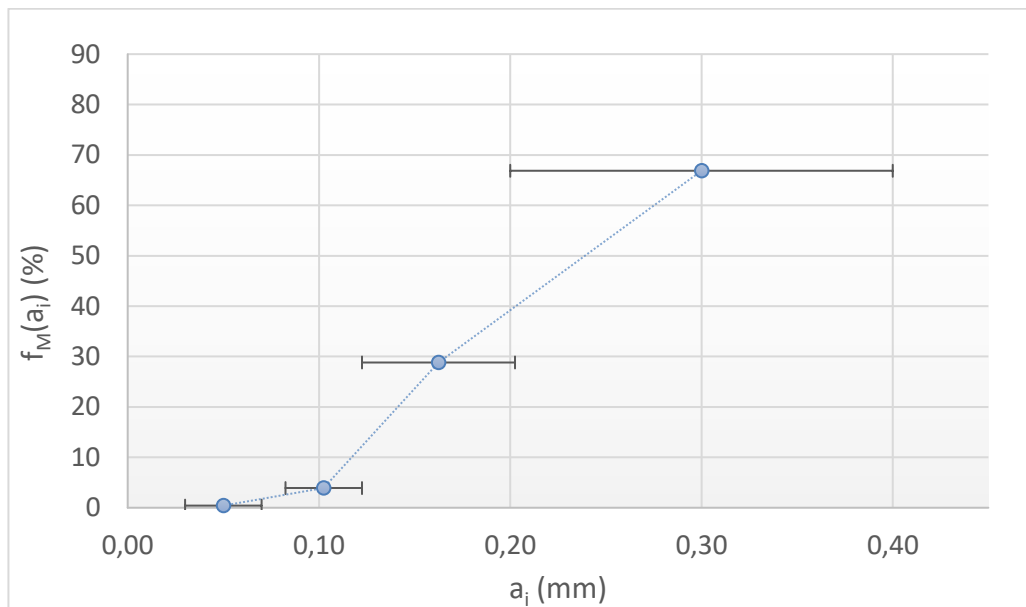
**Figura 4.4. Retenido recuperado de cada uno de los tamices en la granulometría del molido basto.**

Para completar el estudio granulométrico se realizó una granulometría del molido fino. Los datos se presentan en la Tabla 4.5.

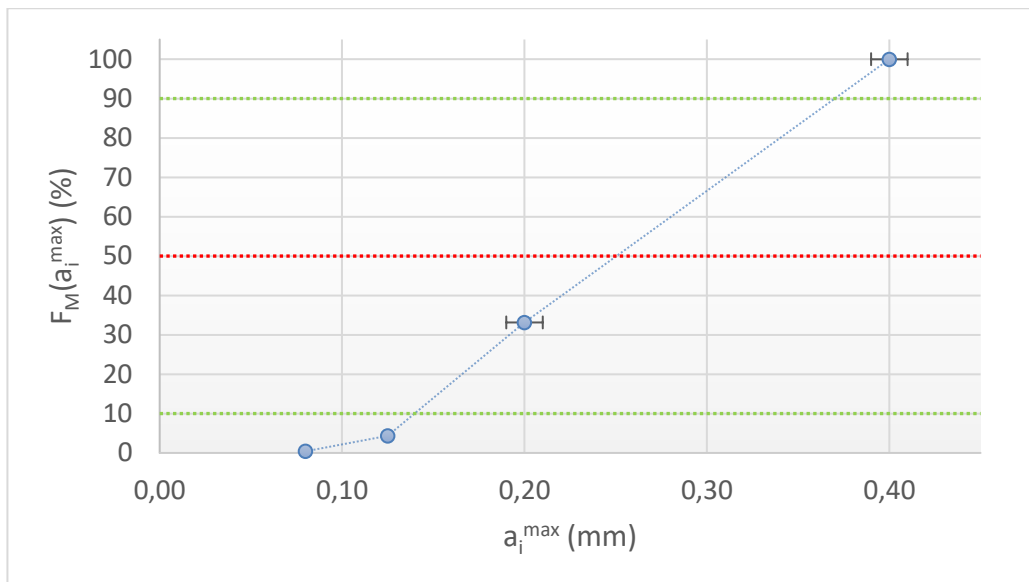
**Tabla 4.5. Resultados de la granulometría del molido fino de los residuos de escayola.**

Luz de tamiz (mm)	Representante intervalos de tamaños ( $a_i$ ) (mm)	Masa retenida fraccionaria ( $f_M(a_i)$ ) (g) ( $\pm 0,02$ )	Masa retenida fraccionaria ( $f_M(a_i)$ ) (%)	Tamaño mayor intervalos de tamaños ( $a_i^{\max}$ ) (mm)	Masa acumulada pequeños a grandes ( $F_M(a_i)$ ) (%)
0,20	$0,3 \pm 0,1$	119,30	$66,86 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,01$	$100,00 \pm 0,06$
0,125	$0,16 \pm 0,04$	51,42	$28,82 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,01$	$33,14 \pm 0,04$
0,080	$0,10 \pm 0,02$	6,96	$3,90 \pm 0,01$	$0,125 \pm 0,001$	$4,32 \pm 0,02$
Ciego	$0,05 \pm 0,04$	0,75	$0,42 \pm 0,01$	$0,080 \pm 0,001$	$0,42 \pm 0,01$

En las Figura 4.5 y 4.6, vemos los datos de esta granulometría representados de forma más clara. En este yeso fino, vemos que el 95% del volumen queda retenido entre el tamiz 0,2 y el 0,125. Teniendo en cuenta que comenzamos la molienda de fino con un tamaño máximo de grano de 0,400 mm, y que lo que pasa por el tamiz 0,125 es un porcentaje insignificante, significa que con la molienda manual solo hemos conseguido avanzar un tamiz.



**Figura 4.5. Función distribución de tamaños fraccionaria ( $f_M(a_i)$ ) en porcentaje en masa obtenida en la granulometría del molido fino.**



**Figura 4.6. Función distribución de tamaños acumulativa ( $F_M(a_i)$ ) en porcentaje en masa obtenida en la granulometría del molido fino. El tamaño medio de la distribución se sitúa en el punto de corte de la curva con el 50% (línea roja horizontal) y la anchura de la distribución de tamaño entre el 10 y el 90% (líneas verdes horizontales).**

A partir de estos datos podemos sacar el tamaño medio, la anchura y el tamaño de grano más probable de nuestro molido fino. Los resultados están en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6. Tamaños característicos obtenidos de la granulometría del molido fino de residuos de escayola.**

	mm
<b>Tamaño medio (50%) (mm)</b>	0,25 ± 0,05
<b>Moda (mm)</b>	0,3 ± 0,1
<b>Anchura ((90-10) %)</b>	0,23 ± 0,20

En caso de requerir un tamaño de grano mayoritariamente inferior a 0,200 o 0,125, como los yesos que se comercializan habitualmente, sería conveniente utilizar un molino capaz de triturar hasta esa finura. Sin embargo, de cara a la norma UNE EN 13279, hemos conseguido una finura de molido acorde con los yesos de construcción descritos en esta norma.

## 4.2. Preparación de las mezclas

### 4.2.1. Determinación de la relación agua/yeso

La relación agua/yeso (R) determina la cantidad de agua que vamos a necesitar al amasar cierta cantidad de yeso. Esta relación va a ser clave de cara al fraguado del yeso e influirá en las propiedades mecánicas de dicho material.

Como se comentó en el Capítulo 3, para la elaboración de las probetas, además de utilizar dos molindas diferentes, se combinaron esas molindas con diferentes relaciones agua/yeso, buscando los conjuntos molinda-relación agua/yeso que se ajustaran a los requisitos para la puesta en obra del yeso reciclado.

En este punto, se exponen los datos que se obtuvieron en los dos tipos de ensayos que se realizaron para determinar esta relación agua/yeso con el molido fino, lo que nos ayudará en la elección de dicho parámetro para la posterior elaboración de las probetas para los ensayos mecánicos.

#### *Amasado a saturación*

Este método determina la cantidad de yeso necesaria por cada 100 gramos de agua. El procedimiento está explicado en el Capítulo 3.

Como dicta la norma UNE-EN 13279-2, se realizaron dos ensayos, cuyos datos se presentan en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7. Datos de los ensayos de amasado por saturación**

Ensayo 1		$\Delta m$
$m_0$	$m_1$	$m_1 - m_0$
360,9	498,3	137,4
Ensayo 2		
$m_0$	$m_1$	$m_1 - m_0$
360,9	492,7	131,8
Promedio		135 ± 3

Para cada ensayo, se utilizó una cantidad de yeso para 100 g de agua, calculada al término del ensayo por diferencia de pesadas  $m_1 - m_0$ . Para determinar la relación agua/yeso, calculamos el promedio de la cantidad de yeso espolvoreado, y aplicamos la siguiente fórmula:

$$R = \frac{100}{(m_1 - m_0)} = 0,7407$$



Aunque la norma nos dice que con repetir dos veces el ensayo es suficiente para determinar R, vamos a hacer propagación de errores instrumentales para estimar la incertidumbre con la que hemos calculado este parámetro. Hemos obtenido una relación agua/yeso  $R = 0,74$ . El error de la relación agua/yeso,  $\Delta R$ , se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta R = \left| \frac{dR}{d(\Delta m)} \right| \Delta(\Delta m) = \left| \frac{-100}{135^2} \right| \cdot 3 = 0,016$$

donde el error de la diferencia de masas promedio ( $\Delta m$ ) es 3, que es el error de la media calculada, como se expresa en la Tabla 4.6.

Por tanto, la relación agua/yeso determinado mediante amasado por saturación es:

$$R = 0,74 \pm 0,02$$

Este valor de R se empleará para hacer dosificaciones de las probetas con las distintas moliendas y con escayola comercial que nos servirá como referencia para las series de reciclado.

### *Fluidez de la pasta*

El segundo método que utilizamos para determinar la relación agua/yeso apropiado para nuestras dosificaciones es el de fluidez de la pasta.

Este método valida una R en función de que el diámetro de escurrimiento de la galleta obtenida al levantar un cono truncado relleno de pasta de yeso se encuentre entre 150 mm y 210 mm, intervalo dado por la norma. En caso de encontrarse fuera de este intervalo, habría que repetir el ensayo regulando la cantidad de yeso. El procedimiento para realizarlo se describe con detalle en el Capítulo 3.

Para la realización de este ensayo, se partió de la cantidad de yeso necesaria para conseguir una  $R=0,74$ , calculada en el ensayo previo. Según esa R, por cada 100 g de agua necesitaremos aproximadamente 135 g de yeso. Como en este ensayo realizamos el amasado con 500 g de agua, multiplicamos por cinco los 135 g de yeso, obteniendo una masa de yeso  $m_2 = 675$  g. Esta masa se deduce de la expresión dada por la norma:

$$R = \frac{500}{m_2}$$

Una vez obtenida la galleta, medimos el diámetro de esta en dos posiciones perpendiculares, y se calcula el valor medio obteniéndose un valor de  $(182 \pm 1)$  mm (Tabla 4.5). Este valor se encuentra dentro del intervalo definido por la norma, con lo cual podemos definir  $R = 0,74$  como una relación agua/yeso óptima para el residuo de yeso obtenido en la molienda de fino, y será nuestra relación agua/yeso de referencia.

Ya tenemos una relación válida que utilizaremos para elaborar las probetas para los ensayos mecánicos. Pero como venimos diciendo, buscamos más de una R para estudiar la influencia de este parámetro sobre las propiedades mecánicas finales del yeso reciclado. Mediante tanteo, se repitió el ensayo de fluidez de la pasta para  $R = 0,54$  y  $R = 0,94$ , una por encima y otra por debajo de  $R = 0,74$ . Los resultados obtenidos en el ensayo de fluidez de la pasta se presentan en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8. Resultados de los ensayos de fluidez de la pasta.**

<b>R</b>	<b>m<sub>2</sub> (g)</b>	<b>D<sub>1</sub> (mm)</b>	<b>D<sub>2</sub> (mm)</b>	<b>D (mm)</b>
0,74	673,00 ± 0,01	181 ± 1	183 ± 1	182 ± 1
0,94	531,91 ± 0,01	206 ± 1	202 ± 1	204 ± 2
0,54	925,93 ± 0,01	163 ± 1	159 ± 1	161 ± 2

Como se puede ver en los resultados, para estas tres relaciones agua/yeso se obtiene una fluidez adecuada para trabajar la escayola reciclada, y son las que usaremos para elaborar las probetas de los ensayos mecánicos.

Aunque las tres relaciones cumplen con la norma, la relación de 0,74 es la que nos ha proporcionado el ensayo de amasado a saturación, y es la que se encuentra más centrada en el intervalo de diámetros obtenidos en el ensayo de fluidez de la pasta, por lo que es la que utilizaremos preferentemente para hacer otros ensayos y para amasar una escayola comercial de referencia.

#### **4.2.2. Determinación del principio de fraguado**

##### *Método del cuchillo*

Mediante el método del cuchillo descrito en el Capítulo 3 se puede conocer el tiempo que tarda en comenzar el fraguado de la pasta de yeso. Esta información nos sirve para estimar el momento en el que podremos comenzar el desmoldado de las probetas de ensayo.

Partiendo de la relación agua/yeso R = 0,74, preparamos la pasta de yeso para realizar el ensayo.

Se preparan 3 galletas, y se realizan cortes con el cuchillo según dicta la norma, hasta que las hendiduras dejan de acercarse. En ese instante, anotamos el tiempo que marca el cronómetro. El tiempo de principio de fraguado se determina según la siguiente fórmula:

$$t_i = t_1 - t_0$$

Como el ensayo se hace con 3 galletas, tomaremos como  $t_i$  definitivo el promedio de las 3 galletas. Todos los datos están recogidos en la Tabla 4.9.

**Tabla 4.9. Tiempos de principio de fraguado obtenidos con el método del cuchillo.**

	$t_0$	$t_1$	$t_i$	$t_i$ (s)
<b>Galleta 1</b>	00'00"	11'30"	11'30"	690
<b>Galleta 2</b>	00'00"	11'47"	11'47"	707
<b>Galleta 3</b>	00'00"	12'33"	12'33"	753
			Promedio:	(717 ± 16) s

Se estima que el error asociado a la medida de cada uno de estos tiempos es de 1 segundo, tiempo necesario para que el observador detecte el momento en el que los filos del corte dejan de acercarse y mirar el cronómetro. A la vista de los resultados de los tres ensayos podemos decir que el principio del tiempo de fraguado promedio será de 11'57", lo que equivale aproximadamente a 12 minutos.

### 4.3. Fabricación de las probetas de escayola reciclada

En el Capítulo 3 se explicaron los criterios de dosificación de las mezclas, el proceso de fabricación de las probetas y la nomenclatura final elegida para las mismas. En este punto se va a profundizar en el proceso de fabricación, aportando algunos detalles y datos que considero pueden resultar interesantes para realizar estos ensayos.

#### AMASADO Y LLENADO DE LOS MOLDES

En la primera parte de la fabricación de las probetas, llevamos a cabo el proceso de amasado, que es mezclar el agua con el yeso, y una vez obtenida la pasta de yeso, el llenado de los moldes de las probetas. Estos procesos se han desarrollado de forma diferente según la granulometría del residuo o la relación agua/yeso seleccionado.

La primera gran diferencia entre las distintas series de probetas es el mezclado. Aunque el procedimiento es el mismo, para las series de fino el proceso fue más sencillo que con las de basto, debido a la textura de la pasta. Las series de fino se perciben muy homogéneas durante el amasado y el llenado del molde, requiriendo un esfuerzo mínimo durante la mezcla y llenándose el molde de forma muy natural. En las series de basto sin embargo, ya desde el amasado comienzan los problemas, debido a la textura tan irregular de la pasta formada y a la aparición de algunas partículas de mayor tamaño. El llenado del molde para estas series también fue problemático, por la aparición de partículas que sobresalían del molde o impedían un llenado completo. Fue necesario en estas series ayudarse de la espátula para conseguir un buen llenado de los moldes.

La R también tiene una gran influencia en el proceso de mezclado y llenado. Con  $R = 0,74$  se consigue un llenado muy bueno, ya que la pasta tiene la consistencia suficiente para asentarse bien en el molde. Con  $R = 0,94$  la tendencia era rebosar y perder mezcla, teniendo que gastar más molido de lo necesario. La serie B054 presentó muchos problemas para el llenado, ya que las partículas eran demasiado grandes, y no había suficiente agua para hacer un buen mezclado, teniendo una apariencia final similar a una barrita de cereales.

## FRAGUADO

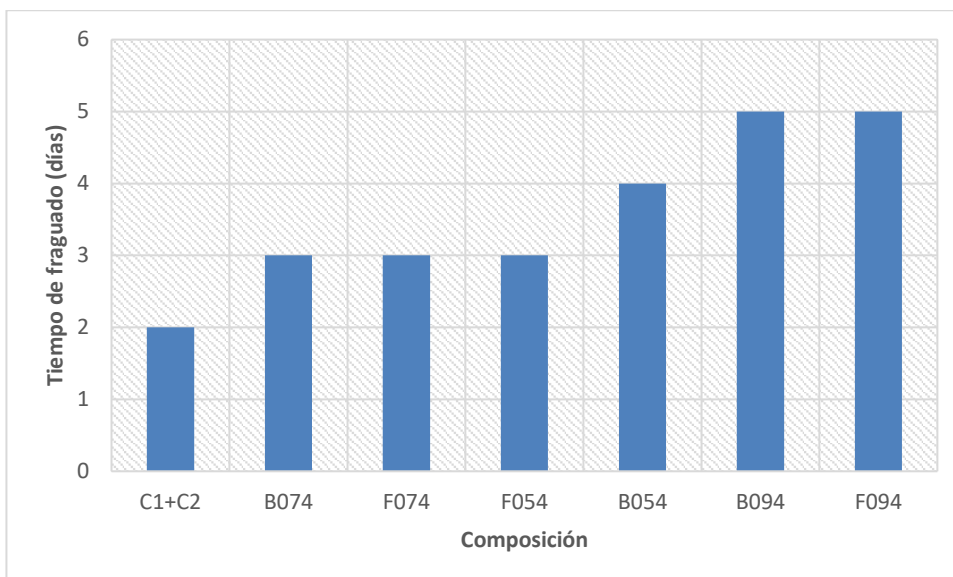
En ensayos previos se determinó el tiempo de principio de fraguado para el molido fino con una  $R = 0,74$ . Controlar este tiempo es trascendental, ya que, si tardamos demasiado en realizar el amasado, puede ocurrir que el fraguado comience antes del llenado del molde. Para mezclas de yeso, este principio de fraguado va a comenzar en torno a los 10 minutos, por lo que la norma ya nos advierte que no tardemos más en realizar el amasado y llenado de los moldes.

Más problemático es averiguar el tiempo que tardará en fraguar la probeta lo suficiente para hacer el desmoldado. En la Tabla 4.10 se indican los tiempos de fraguado observados en las distintas probetas y como se puede comprobar este tiempo de fraguado ha variado mucho, incluso dentro de las probetas de una misma serie. Así que los datos presentados en la Tabla 4.9 solo son una referencia aproximada, a fin de facilitar un intervalo de tiempo donde finalizará el fraguado.

**Tabla 4.10. Tiempos de fraguado de las probetas fabricadas.**

Serie	Tiempo de fraguado (días)
C1 y C2	2
B074	3
F074	3
F054	3
B054	4
B094	5
F094	5

En la Figura 4.7, podemos ver los distintos tiempos de fraguado ordenados de menor a mayor. El menor tiempo (dos días) es para las probetas de yeso comercial, que tenían una  $R = 0,74$ . Según la bibliografía, esto se debe a la finura de molido y a una menor hidratación en su conjunto del sulfato cálcico que forma el yeso comercial, que hace que las reacciones de hidratación ocurran más rápido y solidifique antes. De las probetas de yeso reciclado, las dos series de probetas con  $R = 0,74$  para molido fino y basto fraguaron a los 3 días, pero también tardó este tiempo la serie de fino con  $R = 0,54$ . Las de un mayor contenido en agua ( $R = 0,94$ ) tardaron 5 días en endurecerse suficiente para el desmoldado, lo que nos indica quizás un exceso de agua de amasado.



**Figura 4.7. Comparativa de los tiempos de fraguado hasta desmoldado de las distintas series de probetas.**

Estos resultados muestran que tanto el agua de amasado que se utilice como la granulometría es importante para el tiempo de fraguado del yeso reciclado.

#### **DESMOLDADO**

El desmoldado es la parte más crítica de todo el proceso de fabricación de las probetas por varias causas:

- Fraguado insuficiente de la probeta. Puede darse el caso de que la probeta tiene apariencia de estar lista para el desmolde, y no haber terminado el fraguado por dentro. Si esto ocurre, el desmolde terminará con la probeta rota, por lo que es recomendable ser conservadores con el tiempo de fraguado siempre que sea posible.
- Moldes oxidados o sin lubricar. Es importante preparar adecuadamente los moldes antes de su llenado. Si son de hierro como los utilizados en este trabajo hay que engrasar bien los moldes antes del llenado, pero igual de importante es eliminar los restos de óxido, ya que el óxido contrarresta el efecto lubricante del aceite. Además, las probetas adquieren un color anaranjado. Para evitar todo esto, lo mejor es utilizar una lija para retirar el óxido antes de lubricar.
- El tipo de molde. Hemos utilizado moldes que salen de una pieza, y otros que se pueden desmontar por partes, y puedo decir que los del segundo grupo pueden generar un montón de problemas en el desmoldado, siendo el peor de ellos que la probeta resulte dañada.

Como anécdota, la serie inicial B054 tuvo que ser repetida, ya que las 3 probetas resultaron dañadas durante el proceso de desmoldado. Para este ensayo se dieron todos los factores comentados arriba, pero agravados por la granulometría y la R de esta serie, donde la consistencia de las probetas era muy baja. En otras series donde las mezclas eran más homogéneas, como las F054 y F074, también se encontraron algunos de los problemas mencionados, pero debido a la consistencia de las probetas, estas no resultaron dañadas.

## SECADO

El secado de las probetas consta de dos fases descritas en la norma: una primera, en la que las probetas deben secar una semana a temperatura de laboratorio, y una segunda en la que hay que secarlas en estufa hasta masa constante. Aquí los tiempos fueron similares para todas las series, llegando a masa constante después de dos días de secado en estufa.

## 4.4. Propiedades mecánicas

Para determinar las propiedades mecánicas de nuestras probetas con diferentes relaciones agua/yeso y diferentes granulometrías, se realizan ensayos de rotura a flexión y a compresión. Estos parámetros son los que considera la norma para permitir o no la puesta en obra de los distintos yesos de construcción, y en caso afirmativo, poder comercializarlo clasificado en función de estos parámetros en los distintos tipos de yeso comentados en el Capítulo 2.

### 4.4.1. Ensayos a flexión

Para realizar este ensayo, se utilizó una prensa de flexión descrita en el Capítulo 3. Esta prensa sólo nos da el valor de la fuerza de rotura en kg, valor que utilizaremos para calcular la tensión de rotura con la ecuación de la flexión para este ensayo normalizado.

Como tenemos tres probetas para cada combinación de molienda y relación agua/yeso, calcularemos primero el valor promedio de la fuerza y su incertidumbre será el error cuadrático medio de esos tres valores. Luego utilizaremos la propagación de errores para estimar la incertidumbre de la tensión de rotura a flexión con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{FLEXIÓN} &= \left| \frac{d\sigma}{dF} \right| \Delta F + \left| \frac{d\sigma}{dL} \right| \Delta L + \left| \frac{d\sigma}{da} \right| \Delta a + \left| \frac{d\sigma}{db} \right| \Delta b \\ &= \left| \frac{3}{2} \frac{L}{ab^2} \right| \Delta F + \left| \frac{3}{2} \frac{F}{ab^2} \right| \Delta L + \left| -\frac{3}{2} \frac{FLb^2}{(ab^2)^2} \right| \Delta a + \left| -\frac{3FLa2b}{2(ab^2)^2} \right| \Delta b\end{aligned}$$

donde el error de L, a y b, las constantes geométricas del ensayo, lo estimamos en 1 mm.

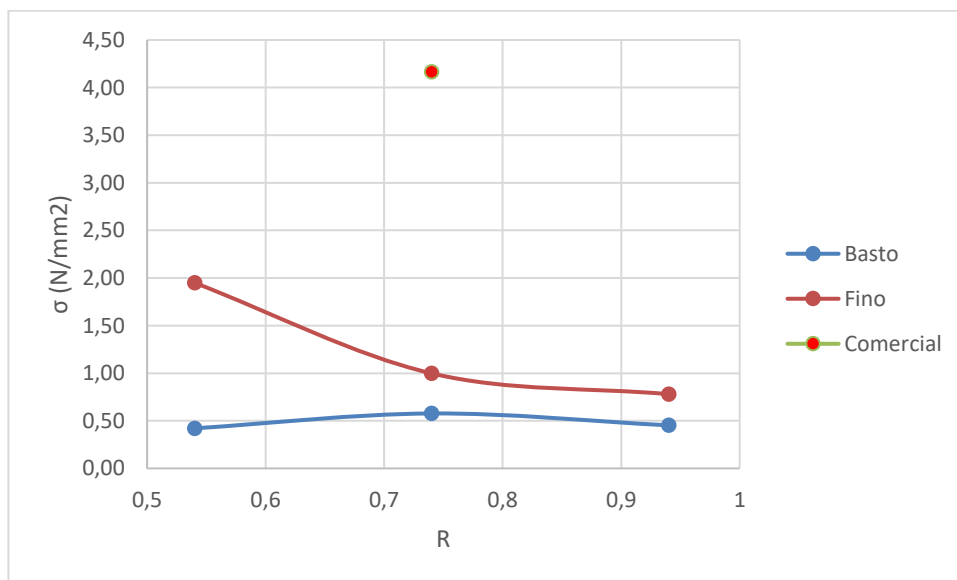
Los datos de los ensayos a flexión se presentan en la Tabla 4.11, con sus respectivos errores estimados.

**Tabla 4.11. Resultados obtenidos en el ensayo de rotura a flexión.**

Probeta	Fuerza de rotura (kg) (± 0,5 kg)			Fuerza promedio (kg)	Resistencia a flexión (N/mm <sup>2</sup> )
C1	186	178	176	180 ± 5	4,2 ± 0,4
C2	170	188	170		
B054	16	20	18	18,0 ± 1,2	0,42 ± 0,05
B074	28	24	22	24,7 ± 1,8	0,58 ± 0,06
B094	18	20	20	19,3 ± 0,7	0,45 ± 0,05
F054	80	78	92	83 ± 4	1,95 ± 0,19
F074	38	44	46	42,7 ± 2,4	1,00 ± 0,10
F094	30	40	30	33 ± 3	0,78 ± 0,08

Vamos a analizar estos datos para poder obtener conclusiones sobre la influencia de los dos parámetros que hemos estudiado, el tamaño medio de grano y la relación agua/yeso, sobre las propiedades a flexión de la escayola reciclada.

En la gráfica de la Figura 4.8 podemos observar el efecto de la relación agua yeso. Para la escayola reciclada con molienda fina el comportamiento es claramente de una resistencia decreciente cuando aumenta el contenido en agua de la mezcla. Este comportamiento es el que se encuentra mayoritariamente en la bibliografía para la resistencia a la flexión (ver por ejemplo (Yu, 2011)). Sin embargo, para el molido basto la resistencia a flexión decrece de R 0,74 a 0,94 (misma tendencia que la anterior), pero fue creciente de 0,54 a 0,74. La baja resistencia obtenida para la relación con menos agua y la granulometría más gruesa muestra el efecto de la granulometría, ya que es posible que esa menor resistencia sea debida tanto a una cantidad de agua insuficiente para la hidratación de las partículas más grandes de yeso reciclado, como a que un tamaño de partícula grande no sea capaz de hidratarse lo suficiente para conseguir un fraguado eficiente.

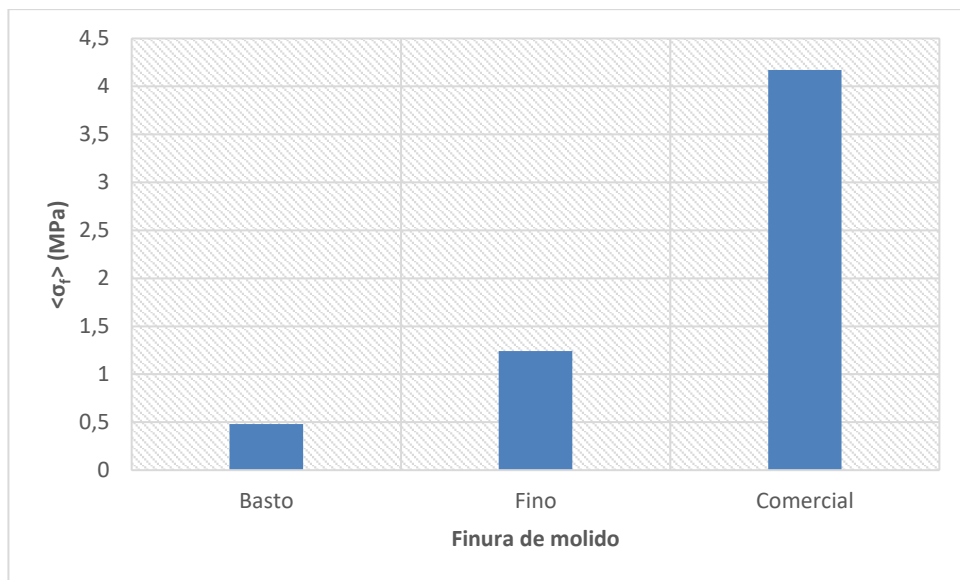


**Figura 4.8. Resistencia a flexión frente a la relación agua/yeso para las distintas finuras de molido.**

Comparando la curva correspondiente a las probetas realizadas con molienda fina con las de la molienda basta vemos en la Figura 4.8 que todas las probetas de grano más fino son más resistentes que las de grano más grueso. Para la relación agua/yeso de referencia

( $R=0,74$ ) la resistencia a flexión del molido basto es poco más de la mitad que la del molido fino, y la del molido fino es cuatro veces menor que la de la escayola comercial de referencia.

Para ver mejor el efecto de la finura del molido podemos promediar la resistencia a flexión de todas las probetas fabricadas y ensayadas con cada granulometría. En la Figura 4.9 se representa el resultado mediante un diagrama de barras. Vemos que a mayor finura de molido mayor resistencia a flexión. Desde el molido basto (tamaño medio en torno a 1 mm) al fino (tamaño medio de 0,25 mm) la resistencia aumenta a más del doble (de 0,48 a 1,24 MPa), y la escayola comercial con un tamaño medio de grano típico del orden de 0,01 mm tiene una resistencia a flexión más del doble que el mejor resultado de todas las series recicladas, que se ha dado para el molido fino con  $R = 0,54$ .



**Figura 4.9. Valores medios de la resistencia a flexión según el tipo de granulometría.**

Hubiera sido interesante para afinar más este estudio, realizando más series de probetas con las distintas granulometrías y para más valores de  $R$ , a fin de confirmar que a menor  $R$  mayor  $\sigma$  para todas las granulometrías y confirmar el efecto de la granulometría en la resistencia a flexión con granulometrías más finas del producto reciclado, pero por cuestión de tiempo y logística no ha sido posible.

Una vez analizado como varía la resistencia a flexión en función de los parámetros  $R$  y granulometría, tenemos que ver si cumplen los mínimos exigidos por la norma UNE EN 13279 para su puesta en obra. En ella, se distingue entre conglomerantes de yeso (A), yesos para la construcción (B) y yesos especiales para la construcción (C).

Para los conglomerantes de yeso, la norma no tiene requisitos mínimos en propiedades mecánicas. Si encontramos en la norma una tabla con las propiedades mecánicas mínimas exigidas para la puesta en obra de los yesos para la construcción, denominados yesos tipo B. Estos yesos, que fueron definidos en el Capítulo 2, son:

- yeso de construcción (B1);
- mortero de yeso (B2);
- mortero de yeso y cal (B3);
- yeso de construcción aligerado (B4);



- mortero aligerado de yeso (B5);
- mortero aligerado de yeso y cal (B6);
- yeso de construcción de alta dureza (B7).

Para flexión, la norma exige una resistencia a flexión  $\geq 1,0 \text{ N/mm}^2$  para los yesos B1 a B6; para los B7, se pide  $\geq 2,0 \text{ N/mm}^2$ .

Siguiendo este criterio, y con los datos obtenidos en la Tabla 4.11, vemos que las únicas series de escayola reciclada que han cumplido son las F054 y F074. Quedan fuera todas las series de molido grueso, por lo que el reciclado de molido basto no se podría comercializar. El reciclado molido fino podría comercializarse con las siglas B1 a B6, dependiendo del resto de su composición y lo que dicta la norma. Como yeso y agua, sería un yeso de construcción B1.

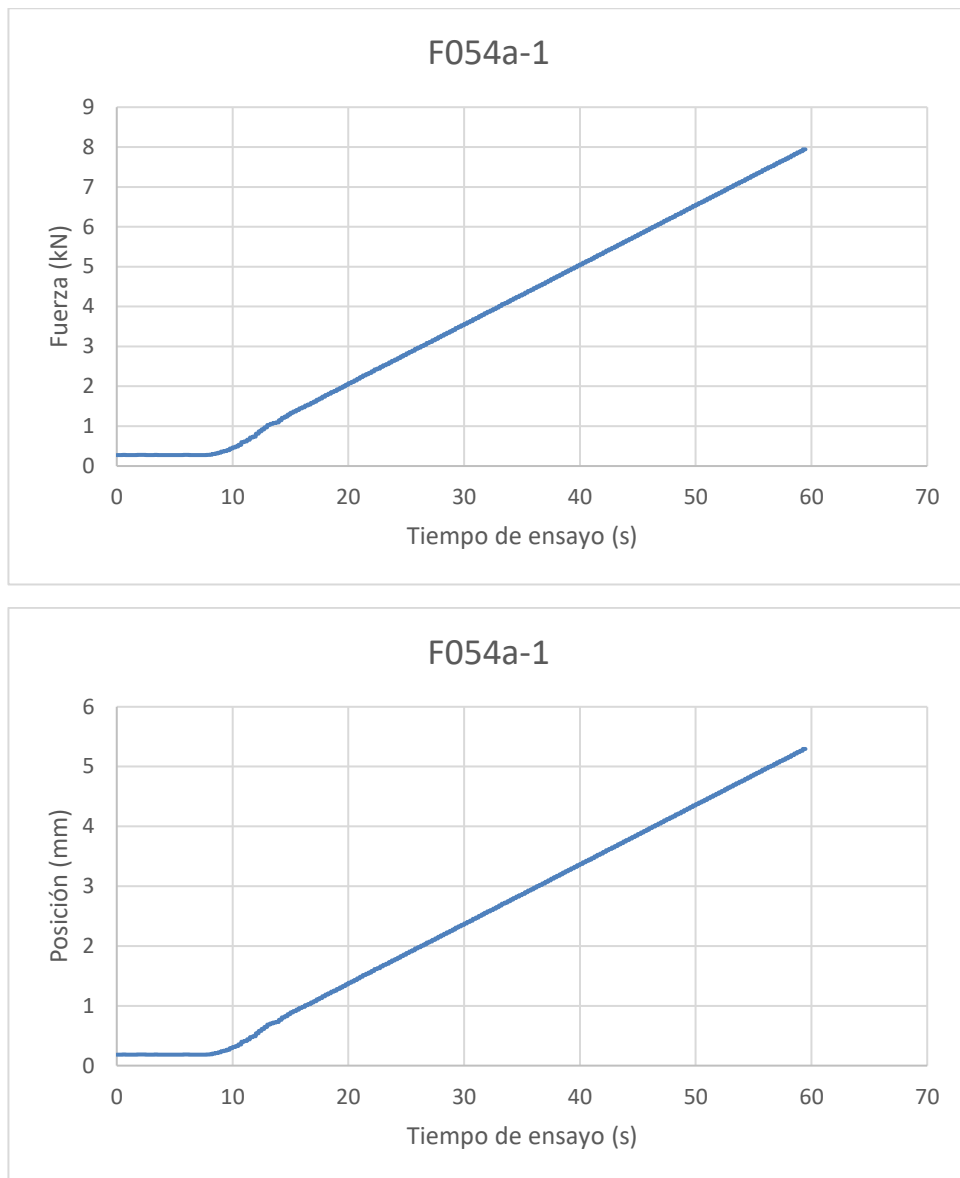
Estos resultados confirman los intervalos de granulometría dictados por la norma, en los que se contempla un tamaño superior de partícula de 1,5 mm. En nuestra molienda de basto, un porcentaje significativo presenta un tamaño superior a este, lo que se traduce en unas propiedades mecánicas insuficientes, al menos a flexión.

En cuanto a la relación agua/yeso, si tomamos de referencia este estudio para futuros proyectos de reciclaje, habría que establecer  $R=0,74$  como límite superior, ya que esta serie cumple justo con el mínimo de la norma y hemos visto que la resistencia a flexión es decreciente con R. En cuanto al límite inferior, haría falta probar con relaciones agua/yesos inferiores a  $R = 0,54$  para determinar hasta que R continúa aumentando la resistencia a flexión.

#### **4.4.2. Ensayos a compresión**

Siguiendo la norma del yeso, los ensayos a compresión se realizan para dos mitades resultantes del ensayo de flexión. Obtenemos por tanto un total de 6 datos para cada tipo de probeta. Como ya se explicó en el Capítulo 3, la máquina de ensayos a compresión utilizada proporciona la curva completa del ensayo hasta rotura. A partir de los datos de la fuerza a compresión, y el desplazamiento de la prensa se puede calcular la tensión máxima a compresión y la deformación a compresión.

En la Figura 4.10 podemos ver dos gráficas que nos muestran la evolución de la fuerza y de la posición a lo largo del ensayo en función del tiempo para la probeta F054a parte 1. En ambas nos encontramos un llano de 10 segundos, que representa el tiempo que tarda la prensa en comenzar a aplicar carga. Y en ambas, los valores de fuerza y posición no dejan de crecer conforme avanza el ensayo, pues la prensa no deja de ejercer fuerza y descender hasta que el ensayo termina.



**Figura 4.10. Evolución de los parámetros registrados durante el ensayo de la probeta F054: Fuerza respecto al tiempo de ensayo, y posición respecto al tiempo de ensayo.**

Un problema que hemos encontrado a la hora de analizar los datos es que el programa vuelca demasiados como para hacer una buena representación de los mismo. Además, al detenerse el ensayo en el momento de la rotura, no toma suficientes valores de la caída de la fuerza como para apreciar bien esa rotura en la gráfica.

La fuerza máxima aplicada durante el ensayo será la fuerza de rotura, y nos permitirá calcular la tensión de rotura o resistencia a compresión utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_{COMPRESIÓN} = \frac{F_{MAX}}{1600}$$

donde 1600 es el área de la probeta en mm<sup>2</sup>. En la estimación de errores utilizaremos la propagación del error del área ( $\pm 4 \text{ mm}^2$ ) y el de la fuerza máxima determinada como el valor medio de al menos 6 medidas independientes. Como ya hicimos para el ensayo de flexión, hemos calculado primero la fuerza promedio para cada tipo de yeso, y con ella hemos

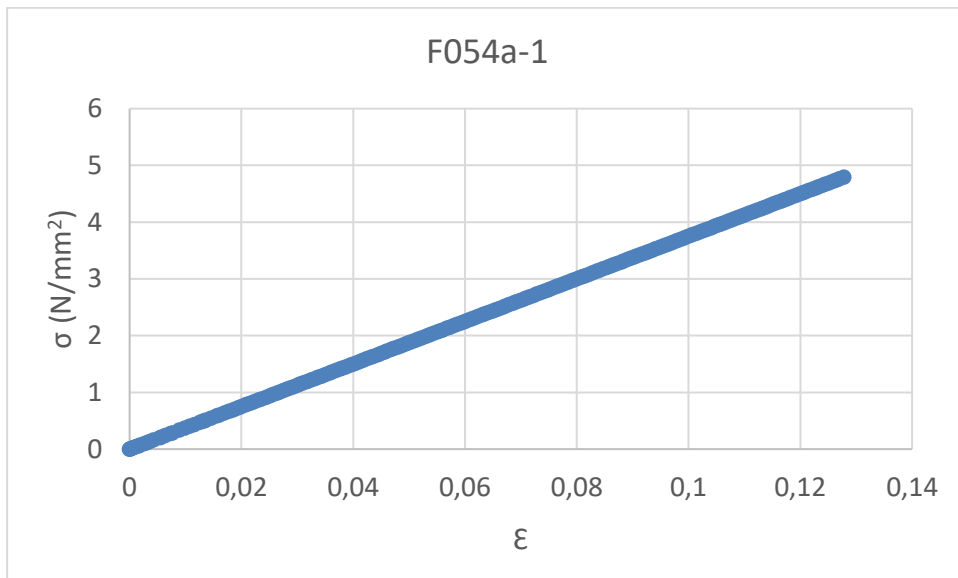
calculado la resistencia a compresión para cada material reciclado y el yeso comercial de referencia. Estos datos se presentan en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12. Resultados obtenidos en el ensayo de rotura a compresión.**

Probeta	Fuerza de rotura (kN) ( $\pm 0,05$ )						Fuerza promedio (kN)	Resistencia a compresión (N/mm <sup>2</sup> )
C1	14,25	12,22	13,51	13,22	11,90	13,27	12,7 $\pm$ 0,9	7,9 $\pm$ 0,8
C2	11,04	11,83	13,75	11,79	13,34	12,30		
B054	3,50	3,25	3,21	4,34	3,55	5,09	3,8 $\pm$ 0,7	2,40 $\pm$ 0,2
B074	1,41	1,49	1,20	1,29	1,34	1,32	1,3 $\pm$ 0,1	0,84 $\pm$ 0,09
B094	1,07	2,46	3,43	2,76	3,77	4,01	2,9 $\pm$ 1	1,82 $\pm$ 0,18
F054	7,94	6,72	7,60	7,51	8,95	7,56	7,7 $\pm$ 0,7	4,82 $\pm$ 0,50
F074	3,47	3,42	3,70	3,86	3,80	3,99	3,7 $\pm$ 0,2	2,32 $\pm$ 0,20
F094	3,64	3,08	3,33	3,49	3,45	3,04	3,3 $\pm$ 0,2	2,09 $\pm$ 0,20

A partir de estos datos, podemos calcular la deformación  $\epsilon$ , que será igual al cociente entre la diferencia de posición y la longitud inicial de la probeta,  $l_0 = (4,0 \pm 0,2)$  cm.

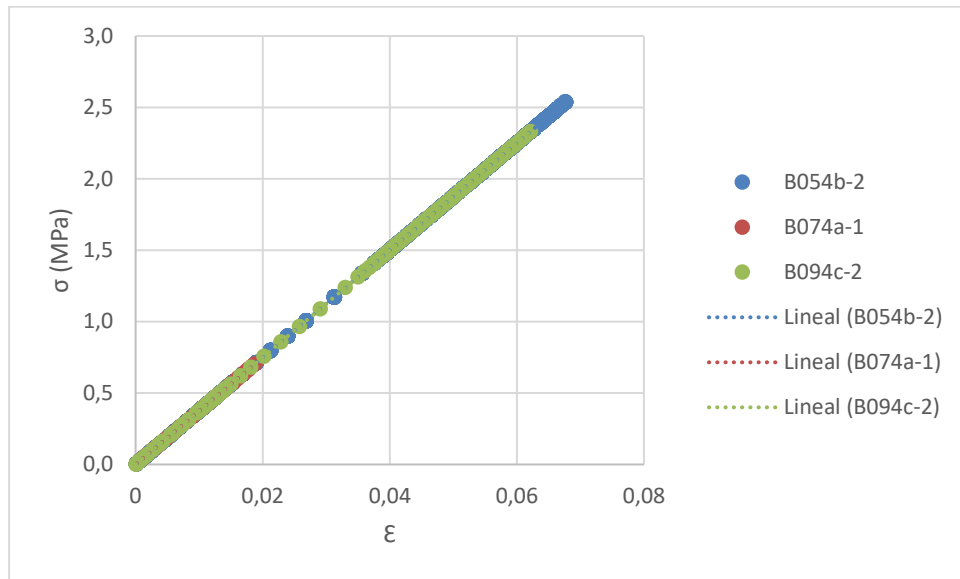
Una vez convertidos la fuerza y posición en tensión y deformación, podremos construir dicha curva y calcular el módulo de Young, que será la pendiente de la recta en la zona elástica. En la Figura 4.11. podemos ver la curva tensión-deformación típica de las probetas de escayola reciclada. Como era de esperar, toda la curva es muy lineal, lo que nos dice que la escayola reciclada es un material cerámico frágil, la probeta rompe antes de alcanzar ningún tipo de deformación plástica.



**Figura 4.11. Curva tensión-deformación del ensayo a compresión de la probeta F054a-1.**

El módulo de Young para el yeso según este ensayo es  $E = 37,5 \pm 0,2$  MPa. Utilizando el mismo criterio, calculamos la curva tensión-deformación para todas las series, y descubrimos que el módulo elástico es el mismo para todas las series. A modo de ejemplo, en la Figura 4.12 se presenta las curvas tensión-deformación para las series B054b-2, B074a-1 y B094c-2, y se observa que la pendiente de la recta, y por tanto E, es igual para

las 3 probetas. Para el molido fino también se obtuvieron los mismos valores de módulo elástico.

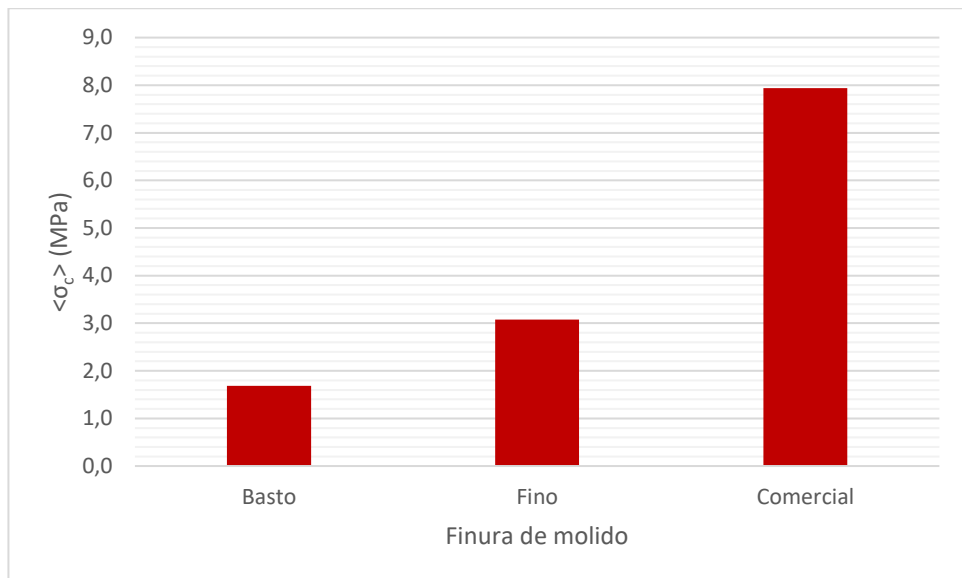


**Figura 4.12. Comparación de curvas tensión-deformación a compresión para distintas probetas realizadas con el molido basto. El módulo de Young es igual para las tres.**

Es de esperar que para un mayor contenido en agua (mayor R) la escayola reciclada tenga más porosidad que para menos cantidad de agua. Por eso, estos resultados nos hacen pensar que el módulo elástico no depende tanto de la porosidad como de las propiedades del yeso.

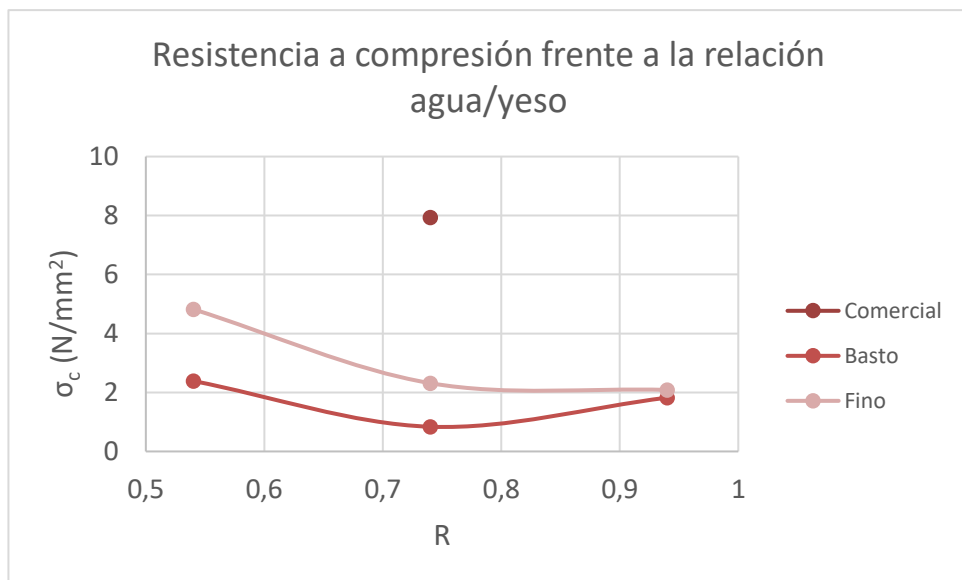
Aunque el módulo elástico sea el mismo para todas las series, la carga de rotura y, por tanto, la resistencia a compresión, sí que ha variado de una serie a otra, dependiendo de la granulometría elegida y de la relación agua/yeso.

En primer lugar vamos a ver el efecto de los dos parámetros de interés en este TFG. En el diagrama de barras de la Figura 4.13 podemos observar los valores medios de la resistencia a compresión de todas las series según su granulometría, molido fino, molido basto, y el yeso comercial, que lo estamos tomando de referencia para las series de reciclado. Recordemos que el tamaño medio de grano del molido basto fue de 1,05 mm con más de un 16 % retenido por el tamiz de luz 0,200 mm, para el molido fino el tamaño medio fue de 0,25 mm y el retenido total en el tamiz 0,2 un 66 %, mientras que en la escayola comercial el retenido en el tamiz 0,2 es de menos de un 1%.



**Figura 4.13. Valores medios de la resistencia a compresión según el tipo de granulometría.**

Analizando la gráfica, observamos una relación directa entre la finura de molido y la resistencia a compresión, consiguiendo mejores resultados al utilizar una granulometría más fina. Vemos además como la resistencia a la compresión de las series de probetas hechas con escayola comercial es más del doble que la de la mejor de nuestras probetas recicladas. Aunque haciendo un molido más fino puede haber todavía margen de mejora con estos productos reciclados, ya que la resistencia del molido fino es el doble que la del molido basto.



**Figura 4.14. Resistencia a compresión frente a la relación agua/yeso para las distintas finuras de molido.**

Observamos ahora el comportamiento a compresión de las probetas de material reciclado según la relación agua/yeso empleada para su fabricación. Los datos se representan en la Figura 4.14 para las series de probetas de molido fino y de molido basto para cada una de las R estudiadas. Para las dos granulometrías estudiadas los mejores resultados se consiguen para la menor R (menos agua). Resulta llamativo que tanto para el molido fino

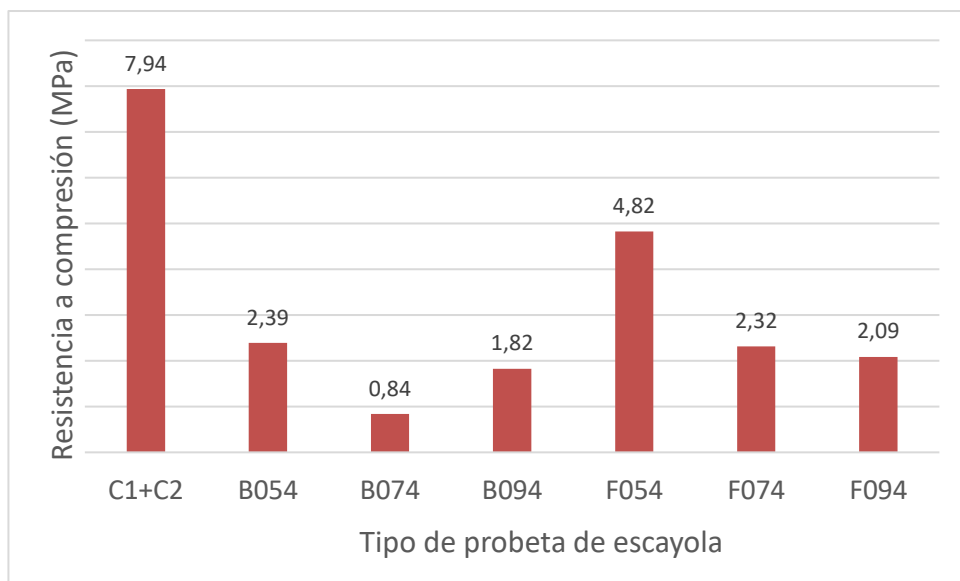
como el basto la resistencia a compresión cae a la mitad desde  $R = 0,54$  a  $R = 0,74$ , que es precisamente la  $R$  optimizada con los ensayos previos.

La resistencia a compresión mínima se ha dado para el molido basto con  $R = 0,74$ . Esta serie de probetas dio la mayor resistencia a la flexión de todas las series con molido basto, por lo que no pensamos que los bajos resultados a compresión se deban a algún fallo en la preparación de las probetas, aunque sería conveniente repetir las series y los ensayos para estar seguros. Si se confirman los resultados, esto nos diría que las probetas de molido basto tendrían más resistencia a tracción que a compresión, ya que en flexión las probetas trabajan a tracción y a compresión.

En esta gráfica vemos también que la resistencia a compresión de las series de escayola comercial es casi el doble del mejor valor de resistencia conseguido con la escayola reciclada. Pero los resultados obtenidos son prometedores ya que hemos visto que la tenemos margen de mejora aumentando la finura del molido y optimizando la relación agua/yeso.

Una vez realizada la comparación entre las resistencias a compresión según el tipo de granulometría o la  $R$  utilizada, toca comprobar los requisitos mínimos de la norma para la puesta en obra del yeso.

En el Capítulo 2 vimos que los yesos de construcción se clasificaban según su uso y propiedades utilizando las letras A, B y C. En el caso de los conglomerantes a base de yeso (A), la norma no especifica propiedades mecánicas mínimas para su uso. Para los yesos tipo B y C, si se solicitan unos requisitos mínimos presentados en las Tablas 4.12 y 4.13.



**Figura 4.15. Valores medios de la resistencia a compresión para cada serie de probetas de escayola comercial ( $R = 0,74$ ), molido basto y molido fino ( $R = 0,54$ ,  $0,74$  y  $0,94$ ).**

En la Figura 4.15 se presentan los valores de resistencia a compresión medios para cada serie que se dieron en la Tabla 4.12. La norma exige un mínimo de  $\sigma_c \geq 2,0$  N/mm<sup>2</sup> para los yesos B1 a B6, y  $\sigma_c \geq 6,0$  N/mm<sup>2</sup> para los B7, así que de nuestras series podríamos fabricar y comercializar las series B054, F054, F074 y F094 como yeso de construcción B1 a B6. Para conseguir un B7 tendríamos que probar diferentes dosificaciones o conseguir una

granulometría más fina, ya que las probetas ensayadas no consiguen esta resistencia mínima.

Para los yesos tipo C, las mismas probetas cumplirían los mínimos exigidos a compresión para yeso para capa fina (C6) y mortero de agarre (C2), pero habría que comprobar si cumplen la condición del tiempo de fraguado haciendo ensayos con la aguja de Vicat, ya que en la tabla de referencia no aparece el dato del tiempo de fraguado con el método del cuchillo.

**Tabla 4.13. Especificaciones para los yesos de construcción, extraído de la norma UNE EN 13279-1.**

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante de yeso %	Tiempo de principio de fraguado mín.		Resistencia a flexión N/mm <sup>2</sup>	Resistencia a compresión N/mm <sup>2</sup>	Dureza superficial N/mm <sup>2</sup>	Adherencia N/mm <sup>2</sup>
		Yeso de aplicación manual	Yeso de proyección mecánica				
B1	> 50	> 20	> 50	≥ 1,0	≥ 2,0	-	La rotura se manifiesta en el soporte o en la masa de yeso; cuando la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor deber ser ≥ 0,1
B2	< 50						
B3	<sup>a</sup>						
B4	> 50						
B5	< 50						
B6	<sup>a</sup>						
B7	> 50			≥ 2,0	≥ 6,0	≥ 2,5	

<sup>a</sup> Según los apartados 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6.

**Tabla 4.14. Especificaciones para los yesos especiales de construcción, extraído de la norma UNE EN 13279-1.**

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante de CaSO <sub>4</sub> %	Finura de molido				Tiempo de principio de fraguado mín.		Resistencia a flexión N/mm <sup>2</sup>		Resistencia a compresión N/mm <sup>2</sup>	
		5 000 µm	1 500 µm	200 µm	100 µm	Vicat	Cuchillo	2h <sup>d</sup>	7d <sup>e</sup>		
C1	Trabajos de yeso fibroso	> 50	0	0	< 1%	< 10%	-	> 8	> 1,5	> 3,0	-
C2	Mortero de agarre	> 50	0	-	-	-	> 30	-	-	-	> 2,0
C3	Yeso acústico <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	> 20	-	-	-	-
C4	Yeso para aislamiento térmico <sup>b</sup>	-	-	-	-	-	> 20	-	-	-	-
C5	Yeso para protección frente al fuego <sup>c</sup>	Desviación respecto al contenido nominal < 10%	-	-	-	-	> 20	-	-	-	-
C6	Yeso para capa fina	> 50	-	0	-	-	> 20	-	-	> 1,0	> 2,0

## **Capítulo 5. Conclusiones**

Al comienzo de este Trabajo de Fin de Grado se plantearon tres objetivos parciales para abordar el reciclaje de placas de escayola obtenidas de residuos de construcción, que fueron:

- Obtener residuos de escayola procedentes de la construcción, y realizar una caracterización de los materiales;
- Una vez aprendidas las características del yeso, reciclarlo, obteniendo un nuevo material reciclado.
- Comprobar si estos materiales reciclados cumplen las características mecánicas para su comercialización y puesta en obra según normativa vigente.

Una vez expuestos y discutidos los resultados en el capítulo anterior, en este capítulo vamos a presentar las principales conclusiones con las que comprobaremos que se han cumplido estos objetivos.

Entre los distintos parámetros que afectan a las características mecánicas de la escayola para su puesta en obra de nuevo, tras estudiar la bibliografía se eligieron dos parámetros a variar de cara a la fabricación de las probetas: la finura de molido y la relación agua/yeso. Nuestros resultados han confirmado que estos dos parámetros son muy importantes en las propiedades mecánicas del material reciclado.

Para variar la finura del molido se realizaron dos tipos de molienda manual, obteniendo dos granulados de producto reciclado que hemos llamados molido basto y molido fino. En el molido basto hay restos visibles de la fibra de vidrio que formaban parte de la placa de escayola y encontramos partículas con tamaños entre 10mm y 0,08mm, con un tamaño medio de 1,1 mm. En el molido fino la fibra de vidrio ya no es visible y se consigue un tamaño medio de partícula de 0,25 mm. La escayola suele comercializarse con tamaños de partículas más pequeñas (tamaños medios del orden de 0,01 mm), pero la finura del molido fino es suficiente para cumplir con la normativa para puesta en obra de yesos y escayolas.

La relación agua/yeso (R) adecuada para fabricar el nuevo material consolidado a partir estos granulados reciclados se estimó mediante amasado a saturación (UNE-EN 13279-2) para el molido fino y se obtuvo un valor de 0,74. Con este resultado, se eligieron tres valores de R para realizar las mezclas:  $R = 0,54$ ,  $0,74$  y  $0,94$  para estudiar el efecto de este parámetro en las propiedades mecánicas de los materiales reciclados. Para estos valores de R, las mezclas preparadas cumplen las características de fluidez de la pasta que exige la norma.

Combinando los dos tipos de finura de molido y tres relaciones agua/yeso se fabricaron seis series de probetas de yeso de reciclado, además de dos series de probetas de una escayola comercial de referencia. Para los reciclados los tiempos de inicio de fraguado se sitúan en torno a los 12 minutos, similar a la escayola comercial, y los tiempos de desmoldado entre 3 y 5 días cuando para la escayola comercial es de dos días. En este sentido, el objetivo de crear materiales reciclados se ha cumplido, pues todas las mezclas fraguaron y se mostraron consistentes.

En cuanto a propiedades mecánicas, se estudió el comportamiento a flexión y a compresión siguiendo la norma. De los resultados a flexión podemos concluir que la resistencia a flexión de todos los materiales reciclados es muy inferior a la de la escayola comercial de referencia.



La resistencia aumenta con la finura del molido, y para el molido fino aumenta cuando se usa menos agua en el amasado (R pequeña), mientras que para el molido basto las variaciones con R son pequeñas. Por otra parte, de los resultados a compresión extraemos conclusiones muy similares: la escayola comercial es el doble de resistente que las escayolas recicladas, la resistencia a compresión aumenta con la finura del molido y para el molido fino la resistencia a compresión aumenta cuando la mezcla tiene menos agua.

Fuera de norma hemos calculado el módulo elástico o módulo de Young de los ensayos a compresión. Con los datos obtenidos, no hemos encontrado diferencias de rigidez entre los distintos productos reciclados, llegando a la conclusión de que este parámetro no es un buen candidato para decidir si el material puede usarse en obra.

Únicamente los productos reciclados fabricados con el molido fino y una relación agua/yeso de 0,54 y 0,74 podrían ser comercializados para su puesta en obra de nuevo como yesos B1 a B6, ya que su resistencia a flexión es mayor de  $1,0 \text{ N/mm}^2$  y su resistencia a compresión mayor de  $2,0 \text{ N/mm}^2$ , como exige la norma. La finura del molido fino y los tiempos de fraguado también son suficientes para cumplir la norma.

Con esta última conclusión se cumple el último objetivo definido en este TFG. Pero han quedado para trabajos futuros varios aspectos en los que habría que profundizar. Como punto importante, sería conveniente conocer la pureza en yeso de los productos reciclados, ya que la clasificación comercial de los yesos y escayolas se basa también en este parámetro.

También habría que estudiar con mayor profundidad el tipo de molienda que se le puede aplicar al residuo, usando un tipo de molino que pueda conseguir un material reciclado más fino, pues según nuestros ensayos la tendencia indica que se conseguirán propiedades mecánicas superiores.

En cuanto a la relación agua/yeso para una determinada finura de molido, también convendría tantear más valores de R ya que sería muy interesante definir un límite inferior para R a partir del cual ya no se mejoren las propiedades mecánicas.

## Capítulo 6. Bibliografía

(Albrecht, 1965) W. Albrecht, *Propiedades de los yesos de moldeo y enlucidos y sus ensayos. International Journal of Environmental Science and Technology* vol.16, (1965) 2475–2480

(Áridos Reciclados) <http://aridosrecicladosdercd.es/blog/el-yeso-y-sus-derivados-un-problema-en-los-residuos-de-construccion-y-demolicion/#:~:text=Al%20disolverse%20produce%20sulfatos%20solubles,de%20firme%20C%20colapsando%20en%20ocasiones>. Última consulta: Diciembre 2020.

(Bieco) <https://www.bioecoactual.com/2014/02/16/breve-historia-del-reciclaje-por-maria-cacheda-divulgadora-cientifica/#:~:text=En%20la%20Prehistoria%20el%20reciclaje,de%20la%20forma%20de%20vida>. Última consulta: Noviembre 2020.

(CE) [https://ec.europa.eu/environment/efe/news/putting-plasterboard-waste-good-use-2016-10-28\\_es](https://ec.europa.eu/environment/efe/news/putting-plasterboard-waste-good-use-2016-10-28_es). Última consulta: Diciembre 2020.

(Derichebourg) <https://www.lyrsa.es/los-origenes-del-reciclaje/>. Última consulta: Noviembre 2020.

(DeSantos, 2011) D. De Santos Marián; B. Monercillo Delgado; A. García Martínez, *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*, La Capell, Barcelona, 2011

(Ecoembes) <https://www.ecoembes.com/es/planeta-recicla/blog/el-reciclaje-fuente-de-empleo-verde>. Última consulta: Noviembre 2020.

(Ecointeligencia) <https://www.ecointeligencia.com/2014/01/historia-reciclaje/>. Última consulta: Diciembre 2020.

(Escayescos) <http://escayescos.com/techos-desmontables/>. Última consulta: Diciembre 2020.

(Fernández) G. Fernández Maroto; *Rocas Industriales y Ornamentales*, Apuntes Universidad de Cantabria. Extraído de: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2825/course/section/2628/tema\\_07.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2825/course/section/2628/tema_07.pdf) Última consulta: Diciembre 2020.

(Jimenez, 2015) A. Jimenez Rivero; A. de Guzman Báez; M. Rodríguez Quijano; J. García Navarro, *Trazabilidad y calidad de los residuos de yeso: Análisis de casos de estudio*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2015.

(Más Ferretería) <https://www.masferreteria.com/blog/herramientas-corte-abrasion-tipos-usos/>. Última consulta: Diciembre 2020.

(MM Chile) <https://www.minmineria.cl/que-es-la-mineria/tipos-de-minerales/>  
Última consulta: Diciembre 2020.

(Navarra Agraria, 2011) J. Irañeta; L. Sanchez; A. Malumbres; J. Torrecilla y E. Díaz, *Abonos minerales: tipos y usos*. Navarra agraria, nº 185, 2011, págs. 45-54

(Química) <https://www.quimica.es/enciclopedia/Escayola.html>. Última consulta: Diciembre 2020.

(Retema) <https://www.retema.es/noticia/una-technica-desarrollada-en-euskadi-permite-reciclar-la-totalidad-del-yeso-de-los-residuos-de-construccion-y-demolicion>. Última consulta: Diciembre 2020.

(SG México) <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Clasificacion-de-los-minerales.html> . Última consulta: Diciembre 2020.

(SIEMCALSA, 2007) *Los minerales industriales en Castilla y León*, Sociedad de Investigación y Explotación de Castilla y León, 2007

(UA) <https://diq.ua.es/yeso/propiedades.htm> Última consulta: Noviembre 2020.

(UNE-EN 13279-1) UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte I, AENOR, 2005.

(UNE-EN 13279-2) UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte II, AENOR, 2005.

(VanHeiningen, 2009) M. Van Heiningen, *La solubilidad y disolución de yeso*, extraído de: [http://espeleogenesis.blogspot.com/2009/07/la-solubilidad-y-disolucion-de-yeso\\_24.html](http://espeleogenesis.blogspot.com/2009/07/la-solubilidad-y-disolucion-de-yeso_24.html)

(Yu 2011) Q.L. Yu, H.J.H. Brouwers, Microstructure and mechanical properties of beta-hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3149-3157.

(Zicla) <https://www.zicla.com/project/reciclaje-de-yeso/#:~:text=De%20acuerdo%20a%20c%C3%A1culos%20basados,2.350.000%20t%2Fa%C3%B1o>. Última consulta: Noviembre 2020.

