

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
ARQUITECTURA**



REGENERACIÓN DEL YESO TRADICIONAL:

**PRESERVANDO LA TRADICIÓN Y MEJORANDO LA
EFICIENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN**

TRADITIONAL GYPSUM PLASTER REGENERATION:

***PRESERVING TRADITION AND IMPROVING
CONSTRUCTION EFFICIENCY***

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Curso 2022-202

Tutor: Prof. David Sanz Arauz

Alumno: Álvaro Marín Serna

Madrid, 13 de enero de 2023

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Álvaro Marín Serna

Regeneración del yeso tradicional:
preservando la tradición y mejorando la eficiencia en la
construcción

TÍTULO TFG: REGENERACIÓN DEL YESO TRADICIONAL

SUBTÍTULO TFG: PRESERVANDO LA TRADICIÓN Y MEJORANDO LA EFICIENCIA EN LA
CONSTRUCCIÓN

Estudiante

Álvaro Marín Serna

Tutor

David Sanz Arauz

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas

Aula TFG 8

Luis Javier Sánchez Aparicio, coordinador

Héctor Navarro Martínez, adjunto

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

INDICE

RESUMEN/PALABRAS CLAVE	5
ABSTRACT/KEY WORDS.....	6
1. INTRODUCCION	7
2. OBJETIVO	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3. DEFINICION DEL ESCENARIO INICIAL.....	8
3.1 Estado del Arte	8
3.1.1 El yeso en la naturaleza.....	8
3.1.2 El yeso artesanal del Bajo Aragón	9
3.1.3 Investigación en cuanto a reciclaje del yeso industrial.....	10
3.2 Escenario de partida	10
4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	11
4.1 Introducción y objetivos generales	11
4.2 Ensayo de caracterización mineral.....	13
4.2.1 Metodología	13
4.2.1.1 Difracción de Rayos X.....	13
4.2.2 Resultados	13
4.2.2.1 Difracción de Rayos X	13
4.2.3 Análisis de los resultados	15
4.3 Ensayos de propiedades físicas y mecánicas.....	15
4.3.1 Metodología	15
4.3.1.1 Ensayo de ultrasonidos.....	16
4.3.1.2 Ensayo de resistencia a flexión (UNE-EN 13279-2)	16
4.3.1.3 Ensayo de resistencia a compresión (UNE-EN 13279-2)	16
4.3.1.4 Ensayo de dureza Brinell.....	17
4.3.1.5 Ensayo de dureza Shore	17
4.3.2 Resultados	17
4.3.2.1 Ensayo de ultrasonidos	18
4.3.2.2 Ensayo de resistencia a flexión (UNE-EN 13279-2)	20
4.3.2.3 Ensayo de resistencia a compresión (UNE-EN 13279-2)	22
4.3.2.4 Ensayo de dureza Brinell	24
4.3.2.5 Ensayo de dureza Shore	26
4.3.3 Análisis de los resultados	29
4.3.3.1 Ensayo de ultrasonidos	29
4.3.3.2 Ensayo de resistencia a flexión (UNE-EN 13279-2).....	29
4.3.3.3 Ensayo de resistencia a compresión (UNE-EN 13279-2)	30
4.3.3.4 Ensayo de dureza Brinell	30
4.3.3.5 Ensayo de dureza Shore	31
5. CONCLUSIONES	33
REFERENCIAS	36

RESUMEN

Actualmente, las aplicaciones del yeso en la construcción son altamente variadas, abarcando desde las técnicas más comunes como los revocos y acabados de yeso, hasta las prácticas decorativas como los estucos y yeserías, incluso otras menos conocidas como los pavimentos. Es en este último caso en el que la utilización del yeso artesanal cocido a altas temperaturas se destaca por encima de los yesos industriales.

Teniendo en cuenta que el yeso es un material conglomerante tan antiguo y utilizado en la arquitectura desde sus orígenes, resulta sorprendente la escasez de publicaciones en español sobre su historia, características, usos y tecnología como material. Esta falta de documentación sobre el yeso tradicional puede ser atribuible, en parte, al desarrollo industrial de los materiales, en el cual, como en el caso del yeso, un mayor control en la fabricación unido a una utilización más especializada ha conllevado el paso de los yesos multifásicos, más complejos, a los yesos industriales monofásicos, más simples, aunque estos últimos son frecuentemente modificados con aditivos. Se presenta, por tanto, la paradoja de haber reducido las propiedades y prestaciones de los yesos antiguos, para que sea necesario añadir un gran número de modificadores a los modernos con el objeto de recuperar algunas de esas propiedades.

Con el objetivo de reintroducir el yeso artesanal en la arquitectura y frente a un futuro en el que los residuos se puedan convertir en recursos, surgió este estudio. El objetivo es regenerar el yeso fabricado de forma tradicional, un yeso cero residuos que crea un ciclo cerrado de usos, respetuoso con el medio ambiente y los principios de economías circulares en los que los materiales de un solo uso desaparecen.

En este estudio se realiza la investigación experimental de las propiedades del yeso reciclado por segunda cocción de residuos de yeso tradicional rehidratado, se elaboran cuatro grupos de muestras que se someten a una serie de ensayos de caracterización mineral y propiedades físicas para demostrar la mejora de las propiedades del yeso al completar el ciclo.

PALABRAS CLAVE

Yeso tradicional · Yeso regenerado · Reciclaje · Residuos

ABSTRACT

Currently, the applications of gypsum plaster in construction are highly varied, ranging from the most common techniques such as plastering and plaster finishes, to decorative practices such as stucco and plasterwork, to less well-known applications such as flooring. It is in this latter case that the use of artisanal gypsum plaster, fired at high temperatures, stands out above industrial plasters.

Given that gypsum is a conglomerate material so ancient and used in architecture from the very beginning, it is surprising the scarcity of publications in Spanish about its history, characteristics, uses, and technology as a material. This gap in literature about traditional plaster may be partly due to the industrial development of materials, in which, as in the case of gypsum plaster, greater control in the manufacturing process coupled with more specialized use has led to a shift from multifaceted, more complex plasters, to industrial, single-phase plasters, although these are frequently modified with additives. As a result, the paradox arises of having reduced the properties and performance of ancient plasters, so that it becomes necessary to add a vast number of modifiers to modern ones to recover some of those properties.

This study emerges with the aim of reintroducing artisanal gypsum plaster in architecture and considering a future in which waste can be converted into resources. The goal is to regenerate plaster made in the traditional way, a zero-waste plaster that creates a closed-loop use cycle, respectful of the environment and the principles of circular economies in which single-use materials disappear.

In research on the properties of gypsum recycled by second firing of traditional rehydrated gypsum residues, four groups of samples were prepared and subjected to a series of tests of mineral characterization and physical properties to demonstrate the improvement of gypsum properties at the end of the cycle.

KEY WORDS

Traditional plaster · Regenerated plaster · Recycling · Waste.

1. INTRODUCCION

En el campo de la arquitectura, el yeso tradicional es un conglomerante muy versátil, ampliamente utilizado en diversos sistemas constructivos, desde elementos estructurales hasta revestimientos y solados, así como en elementos ornamentales. El conocimiento sobre este material es limitado, basándose principalmente en la tradición oral y en el estudio del patrimonio construido. En particular, el yeso artesanal protagonista de este estudio se elabora a partir del subproducto de la producción de alabastro en canteras de Albalate del Arzobispo, Teruel. El aprovechamiento de este desecho material, considerado como residuo, otorga mayor valor al producto final debido a su enfoque en el medio ambiente y la economía circular.

Teniendo en cuenta la amenaza global del cambio climático, resulta esencial proteger la naturaleza y la biodiversidad. En este sentido, el sector de la construcción tiene un gran desafío y oportunidad para trabajar y contribuir a soluciones más sostenibles mediante el modelo de economía circular.

Este estudio se desarrolla en el marco de la asignatura Trabajo Fin de Carrera de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, y presenta los resultados de la elaboración de yeso artesanal a partir del subproducto de la producción de alabastro, un tipo de yeso que puede considerarse prácticamente único de la región de Bajo Aragón, y su posterior regeneración en laboratorio.

Se incluyen el objetivo, el estado del arte, los ensayos realizados, la metodología y la interpretación de los resultados obtenidos, así como la caracterización del material. Finalmente, se presentan las conclusiones y posibles aplicaciones futuras.



Ilustración 1: ubicación de Albalate del Arzobispo. Fuente: Wikipedia

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es la investigación experimental de las propiedades del yeso reciclado por segunda cocción de residuos de yeso tradicional rehidratado, documentando las propiedades del yeso tradicional de primera mano frente a las obtenidas como resultado de la elaboración del yeso artesanal regenerado a partir del subproducto de la producción de alabastro del Bajo Aragón.

2.2 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Definición del escenario inicial y Estado del Arte.
- Realización de ensayos de laboratorio.
- Evaluación y comparación de los resultados obtenidos.
- Elaboración de hipótesis y conclusiones.

Las conclusiones de este estudio se basan en la elaboración de hipótesis que expliquen los resultados obtenidos en los ensayos y la aplicación de estos resultados como innovación tecnológica en el campo de la arquitectura.

3. DEFINICION DEL ESCENARIO INICIAL

3.1 Estado del Arte

El siguiente estudio presenta un estado del arte un tanto abstracto puesto que el yeso tradicional es un material muy poco conocido actualmente. De cara a conocer el escenario inicial en el que nos encontramos, dividimos el estado del Arte en tres puntos, el yeso en la naturaleza, el yeso artesanal del Bajo Aragón y el desarrollo hasta la fecha de la investigación en cuanto a reciclaje del yeso industrial.

3.1.1 El yeso en la naturaleza

El yeso es una roca sedimentaria química compuesta mayoritariamente por el mineral del mismo nombre ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y que se forma generalmente como resultado de la precipitación por concentración de iones disueltos en agua salada o salmuera. La precipitación de sales evaporativas en cuencas restringidas se produce bajo condiciones climáticas áridas, donde la pérdida de agua es superior a la entrada.



Ilustración 2: yeso en la naturaleza. Fuente: elaboración propia. Cuenca, Castilla-La Mancha



Ilustración 3: afloración de beta de yeso. Fuente: elaboración propia, Cuenca Castilla-La Mancha

El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es una sal que precipita en ambiente sedimentario superficial (eogénesis), con texturas que podemos denominar primarias o deposicionales. Cuando el yeso se entierra a una profundidad suficiente (por acumulación de sedimentos sobre él o por movimientos tectónicos), en el ambiente diagenético denominado mesogénesis se deshidrata y se transforma en anhidrita (CaSO_4). En el caso de que esta anhidrita vuelva a condiciones superficiales (por ejemplo, por erosión de los materiales que tiene encima o por movimientos tectónicos) se puede hidratar y transformarse de nuevo en yeso, que en este caso denominaríamos yeso secundario. (Sanz D. & Sepulcre A., 2022). Este es el ciclo yeso-anhidrita, y en él se basa el desarrollo de este estudio.

3.1.2 El yeso artesanal del Bajo Aragón

La situación geográfica de Teruel le hace ser el punto de unión entre el Sistema Ibérico y la Depresión Geológica del Ebro, localización en la que encontramos los yesos protagonistas de este estudio, yesos de Albarracín o yesos alabastrinos. Los encontramos principalmente en la cuenca del Ebro pues surgieron en las zonas de transición entre el centro y el borde de cuenca, alrededor de los ríos Jiloca (Fuentes de Jiloca) y Perejiles (Torres y Mieres), en extensas canteras de mega nódulos de alabastro (Sanz D., 2022).



Ilustraciones 4 y 5: antiguas excavaciones rurales para extraer yeso. Fuente: elaboración propia. Cuenca, Castilla-La Mancha

Las reservas de yeso en Aragón son abundantes y constituyen la mayor mancha yesífera de Europa, con recursos superiores a 11.000 Mm³. (Navas, y otros, 2007). Además, son yesos de gran pureza aptos para la elaboración de prefabricados, yesos blancos y/o escayolas. El trabajo histórico con el material es conocido y se puede visualizar en los recurrentes yacimientos de yeso y frentes de cantera abandonados, localizados en su mayoría en el Terciario de la Depresión del Ebro y Calatayud y, en menor medida, en el Mesozoico de la Ibérica y Prepirineo (Escavy, Herrero & Arribas, 2012). Sin embargo, en el ámbito español la producción de yeso aragonés ha disminuido, y actualmente solo recoge un 7,24% del total, siendo más importante en otros lugares, como Almería o Madrid.

Las amplias existencias de alabastro de las que dispone Aragón lo convierten, por mucho, en el principal productor español del mineral. Así, en el año 2019, prácticamente toda la explotación española de alabastro (99,02%) se concentraba en Aragón, en un total de cinco explotaciones. Cuatro de ellas localizadas en la provincia de Zaragoza y una en la provincia de Teruel.

El yeso, al ser un mineral blando (en segunda posición en la escala de dureza de Mohs) y de procedencia sedimentaria (lo que conlleva una gran cantidad de impurezas), presenta un método de extracción, explotación, minería y tratamiento diferenciado al realizado para otros yacimientos minerales. Estas características confieren a la piedra de aljez una sencillez de extracción que ha favorecido su extracción a lo largo del tiempo, al no requerir de complicados medios técnicos ni de costes añadidos para su producción.

Tanto es así, que históricamente se habría desarrollado esta extracción en áreas rurales, sin siquiera desarrollarse en explotaciones registradas o sin la expedición de licencias oficiales para ello; los vecinos de la zona desarrollaban en esta explotación generalmente para consumo propio, satisfaciendo las necesidades puntuales de los edificios circundantes sin la intención de producir grandes cantidades de material ni beneficios más allá de los propios (Spina V.L., 2016).

3.1.3 Investigación en cuanto a reciclaje del yeso industrial.

El consumo de yeso de yeso está creciendo en ciudades como Brasil debido al aumento de las nuevas tecnologías de construcción y a las necesidades de entrega rápida de edificios. El material se utiliza en revestimientos de paredes, placas, componentes prefabricados y bloques. Como consecuencia, la cantidad de residuos ha aumentado de la misma manera, y la posibilidad de reciclaje es una alternativa que está ganando peso. El proceso de reciclaje debe ser muy simple y fácil de hacer para llegar a las pequeñas empresas.

El yeso es un material muy utilizado en la construcción y se considera que representa entre un 0,5 y 1,5% de los residuos totales generados por esta actividad. De acuerdo con cálculos basados en los metros cuadrados construidos en los países que integran la Unión Europea, se estima que el volumen de residuos de yeso procedentes de construcción, renovación o demolición de edificios es de aproximadamente 2.350.000 t/año. La cantidad de residuos postindustriales generados en el proceso de fabricación de productos de yeso se estima en 627.600 t/año, una parte de la cual se recicla nuevamente.

Una parte importante de la producción de yeso se destina a la fabricación de placas de yeso laminado, las llamadas PYL. Estas placas son ampliamente utilizadas en el sector de la construcción para todo tipo de obras (residencial, no residencial o rehabilitaciones, etc.). Básicamente, están constituidas por un alma de yeso recubierta en ambos lados por capas de celulosa (papel y cartón), que representan aproximadamente el 6% del peso total. En el mercado, se presentan en forma de tableros de diferentes dimensiones y espesores.

Los productos de yeso se pueden reciclar indefinidamente, ya que siempre mantienen sus propiedades naturales después de cada ciclo de reciclaje. El proyecto REPLAY ha estudiado aplicaciones innovadoras de los residuos de yeso procedente de las placas de yeso laminado PYL de origen posindustrial y de posconsumo (residuos de construcción y demolición).

El principal objetivo del proyecto ha sido estudiar el reciclaje de yeso y obtener yeso reciclado con una calidad suficiente para que pueda reintegrarse al proceso de fabricación de PYL o de otros elementos constructivos.

También se han estudiado aplicaciones alternativas del yeso reciclado en lechos animales y en sustratos para cultivos.

El yeso se considera un aglutinante sostenible, producido por la calcinación de yeso, al controlar el tratamiento térmico, el sulfato de calcio dihidrato pierde el 75 % de su agua combinada, y se produce el hemihidrato de sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). La reacción es reversible y, una vez en contacto con el agua, el hemihidrato se hidrata y se transforma en la forma deshidratada.

3.2 Escenario de partida

En la actualidad, las aplicaciones del yeso en la construcción son muy variadas, desde las más habituales como revocos y enlucidos de yeso, prácticas decorativas como estucos y yeserías hasta otras menos conocidas como los pavimentos. Es este último caso en el que la utilización del yeso artesanal cocido a altas temperaturas destaca sobre los yesos industriales.

Siendo el yeso conglomerante un material tan antiguo y usado en la arquitectura desde un primer momento, son escasas las publicaciones en español sobre su historia, características, usos y tecnología como material.

Esta laguna en la literatura sobre el yeso tradicional puede ser debida, en parte, al propio desarrollo industrial de materiales en los que, como en el caso del yeso, un mayor control en la

fabricación unido a una utilización más especializada ha conllevado el paso de los yesos multifásicos, más complejos, a yesos industriales monofásicos, más simples. Aunque estos últimos frecuentemente modificados con aditivos. Se da, por tanto, la paradoja de haber reducido las propiedades y prestaciones de los yesos antiguos, para que se haga necesario añadir un sinnúmero de modificadores a los modernos con el objeto de recuperar algunas de esas propiedades (Sanz D. & Sepulcre A., 2022).

Con el objetivo de reintroducir el yeso artesanal en la arquitectura y de cara a un futuro en el que los residuos se puedan convertir en recursos surge este estudio. Regenerar el yeso fabricado al modo tradicional, un yeso cero residuos que crea un ciclo cerrado de usos, respetuoso con el medio ambiente y los principios de economías circulares en los que los materiales de un solo uso desaparecen.

4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4.1 Introducción y objetivos generales

De cara a comprobar la evolución del yeso tras su cocción y la variación de las propiedades durante este proceso, es necesario conocer las propiedades de los productos hidratados finales. El presente estudio persigue conocer en detalle todas las transformaciones de la materia prima en el proceso de cocción y reciclaje. Para ello se ha trabajado en dos ámbitos experimentales:

1. Caracterización mineral y petrológica
2. Ensayo de las propiedades físicas y mecánicas.

Todas las pruebas se realizan a partir de cuatro muestras distintas, denominadas: Muestra 0, Muestra 1, Muestra 2 y Muestra 3.



Ilustración 5: Muestra 1.
Fuente: elaboración propia



Ilustración 7: Muestra 2.
Fuente: elaboración propia

MUESTRA 0: materia prima, muestra elaborada por David Sanz en hornos tradicionales en la cocción de mayo de 2022 para su “estudio sobre los impactos del ciclo de vida y costes del ciclo de vida de nave industrial para BREEAM MAT-1 y GST-5”.

MUESTRA 1: yeso fraguado de primera mano, obtenido del resultado de añadir agua a la muestra 1.

MUESTRA 2: yeso cocido de laboratorio, resultado de cocer en el horno la muestra 2.



*Ilustración 8: Muestra 3.
Fuente: elaboración propia*

MUESTRA 3: yeso regenerado, objetivo del estudio y muestra elaborada como resultado de añadir agua a la muestra 3.

Se realiza un seguimiento y documentación de cada una de las muestras. Los datos obtenidos se han expresado en forma gráfica para conocer la variación tras el proceso.

Para los ensayos de caracterización mineral se usan las cuatro muestras distintas, mientras que para los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas se emplean solo las muestras fraguadas (muestra 1 y muestra 3).

Se han elaborado probetas con yeso de la muestra 0 (yeso cocido por David Sanz) y 2 (yeso cocido en el laboratorio), obteniendo las muestras 1 y 3 respectivamente, de yeso fraguado. Tras el desmontado se han seleccionado las probetas de mayor calidad para el estudio de sus propiedades físicas y mecánicas. Estos ensayos comprenden:

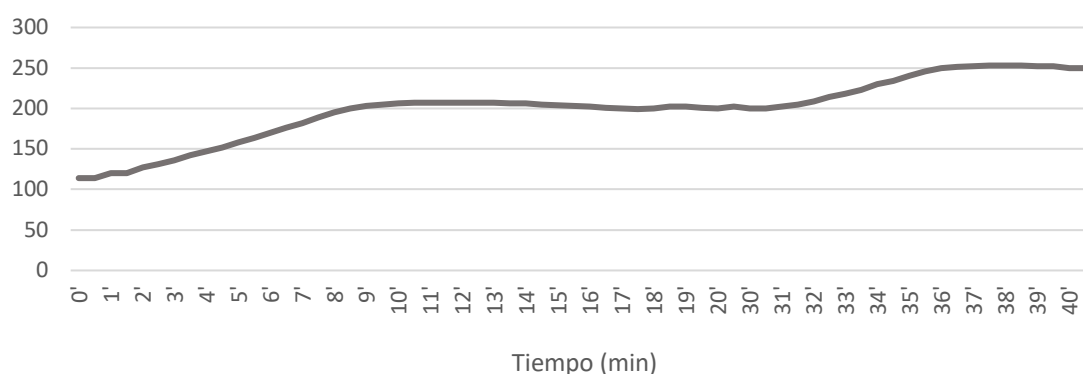
1. Ultrasonidos
2. Flexión
3. Compresión
4. Dureza Brinell
5. Dureza Shore

Se establecen unas condiciones iniciales para la elaboración de las probetas y la realización de las posteriores pruebas.

Se determina la relación agua/yeso = 0,5 para elaborar las probetas, se utiliza el doble de yeso que de agua.

La cocción en el horno de laboratorio se lleva a cabo a 250°C durante 24 horas, durante la primera hora el horno asciende progresivamente hasta los 200°C y tras las 24 horas de cocción se deja enfriar durante otras 24 horas.

Tabla 1: curva de calentamiento del horno de laboratorio



4.2 Ensayo de caracterización mineral

4.2.1 Metodología

4.2.1.1 Difracción de Rayos X

La difracción de Rayos X es una técnica instrumental de tipo físico, en la que, en el método del polvo cristalino, una muestra pulverizada y tamizada a tamaño muy fino, es bombardeada con Rayos X, colocada en una pletina metálica de aluminio, en un soporte que gira frente a un haz de rayos generados en un tubo de Rayos X.

El fraccionamiento por pulverización y el giro de la muestra permiten que se produzcan colisiones de los Rayos X con todos los átomos presentes en las distintas configuraciones cristalográficas y minerales.

Los Rayos X, al atravesar los cristales interactúan con los electrones de los átomos y dispersan su radiación de en forma de trenes de ondas. En el método del polvo cristalino el resultado es un diagrama de intensidades y espacios a determinados ángulos de difracción. Cada sustancia tiene tres líneas de intensidad máxima en cada diagrama que son las que permiten su identificación.

El equipo empleado para la obtención de los datos de difracción de Rayos X es un difractómetro Bruker modelo D8 ADVANCE. Los diagramas de difracción de polvo desorientado para caracterizar la mineralogía de las muestras se han obtenido en un intervalo angular de 2 a 65°, un tamaño de paso de 0,02° y un tiempo de paso de 1s.

4.2.2 Resultados

4.2.2.1 Difracción de Rayos X

Se muestran a continuación los diagramas obtenidos de la difracción de Rayos X:

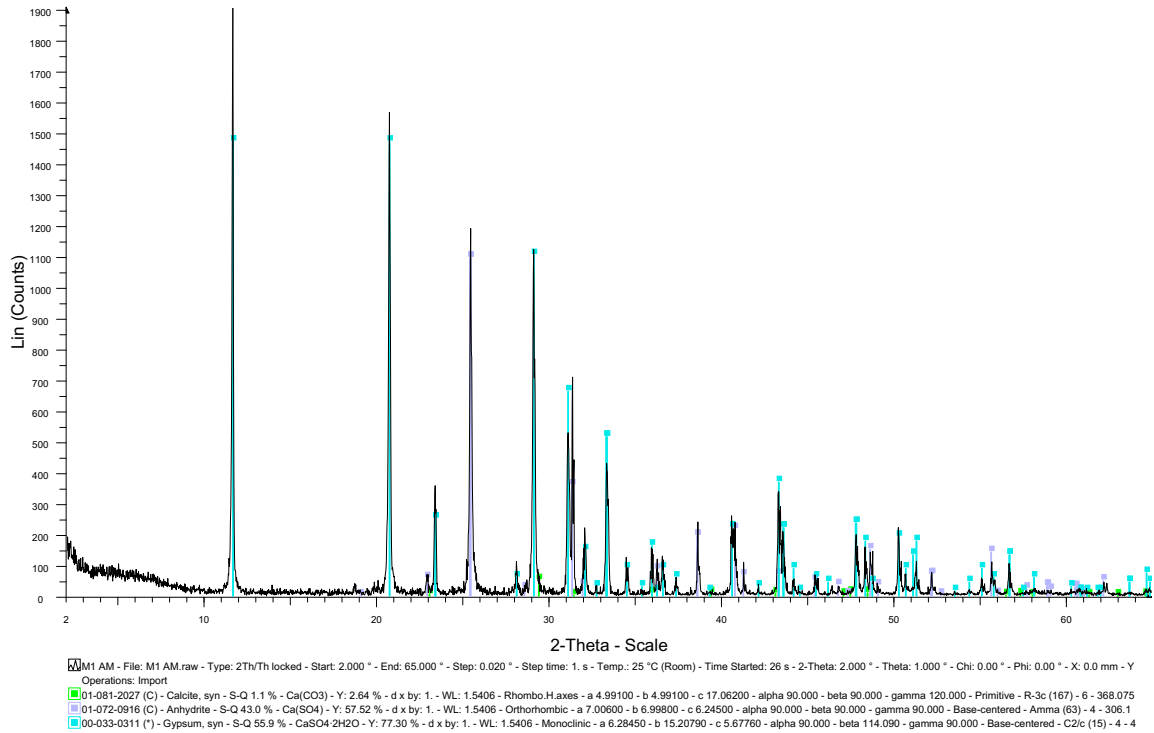
Tabla 2: resultados del ensayo de difracción de Rayos X

MUESTRA	FASES CRISTALINAS			
	YESO (%)	BASANITA (%)	ANHIDRITA (%)	CALCITA (%)
MUESTRA 0	3	6	91	-
MUESTRA 1	56	-	43	1
MUESTRA 2	-	27	71	2
MUESTRA 3	67	2	29	2

Diagramas

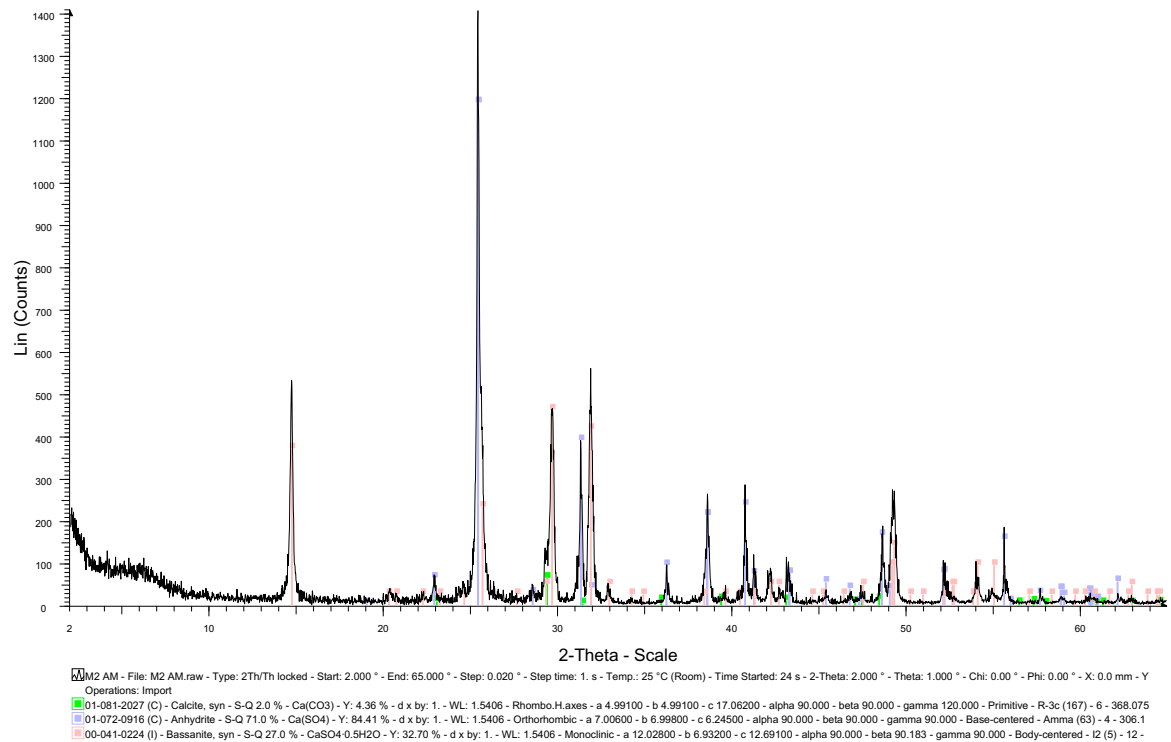
Muestra 1

Tabla 3: Muestra 1. Diagrama del ensayo de difracción de Rayos X. Fuente: CAI de Geológicas



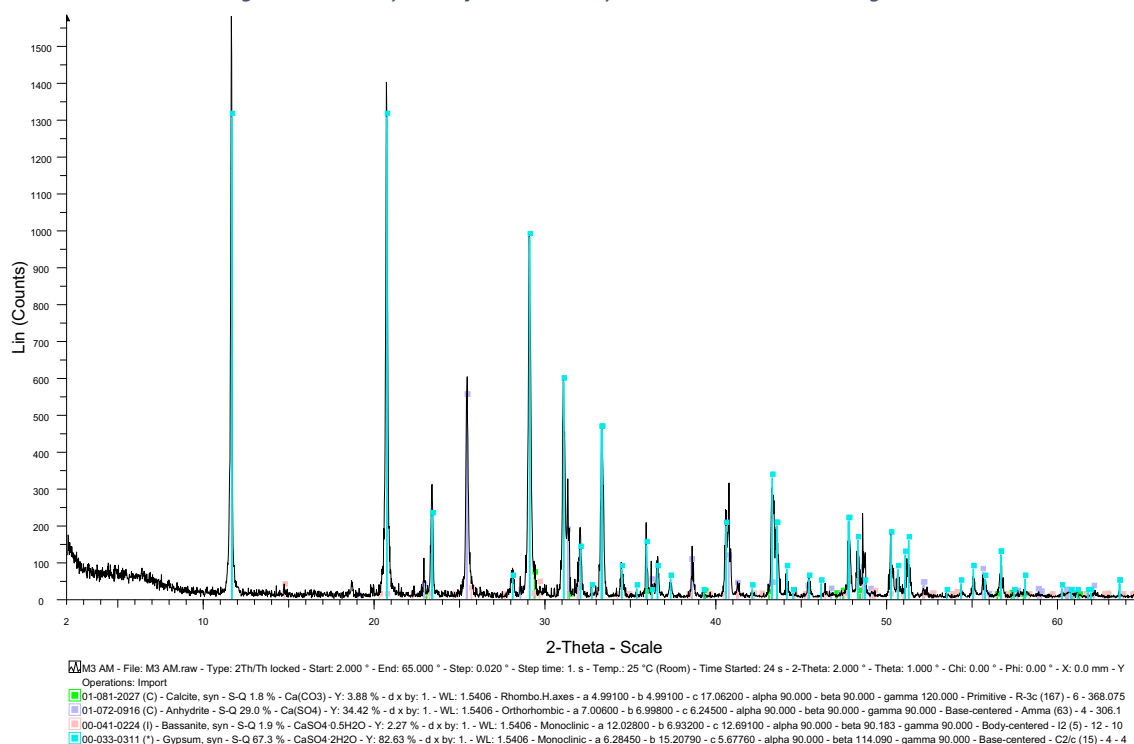
MUESTRA 2

Tabla 4: Muestra 2. Diagrama del ensayo de difracción de Rayos X. Fuente: CAI de Geológicas



MUESTRA 3

Tabla 5:: Muestra 3. Diagrama del ensayo de difracción de Rayos X. Fuente: CAI de Geológicas



4.2.3 Análisis de los resultados

Comparando los resultados se observan cambios en la composición cristalina entre las distintas muestras. Coincidiendo los resultados con la teoría del ciclo yeso-anhidrita.

En la muestra 0 está formada por anhidrita (CaSO_4) en un 91%, se observan unos pequeños porcentajes de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), se trata de una de una muestra que ha pasado por el horno y ha perdido las moléculas de H_2O . La muestra 1 es una mezcla de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4), yeso fraguado de primera mano, gran parte de la anhidrita se ha transformado en yeso con la adición de agua a la muestra. La muestra 2 está formada principalmente por anhidrita (CaSO_4), durante el proceso de cocción se han conseguido eliminar las moléculas de agua en el 71% de la muestra, quedando un mayor porcentaje de basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) que en la muestra 0. Por último, en la muestra 3 predomina el yeso, en este caso se ha conseguido transformar un porcentaje de anhidrita (CaSO_4), mayor que en la muestra 1, quedando un 67% de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

4.3 Ensayos de propiedades físicas y mecánicas

4.3.1 Metodología

Se elaboran dos grupos de probetas. El primer grupo de probetas se elabora a partir de la muestra 0 (yeso en polvo cocido por David Sanz) dando lugar al yeso muestra 1 (yeso fraguado 1) y el segundo grupo, elaborado a partir de la muestra 2 (resultado de cocer la muestra 1) dando lugar a la muestra 3, yeso regenerado (yeso fraguado 2).

4.3.1.1 Ensayo de ultrasonidos

Siguiendo las directrices de la norma UNE-EN ISO 16810:2012 “Ensayos no destructivos. Ensayos por ultrasonido. Principios generales”, se determina el tiempo que tarda en atravesar una frecuencia, la longitud de la probeta. De esta manera determinamos la compactibilidad de la probeta, la existencia o no de poros o imperfecciones en su interior y la calidad de esta.

Se colocan dos palpadores en los extremos cortos de la probeta, separados una distancia de 160mm, siendo uno el emisor y otro el receptor. Mediante la centralita obtenemos el tiempo que tarda la frecuencia en recorrer la probeta y la velocidad a la que se ha producido.

4.3.1.2 Ensayo de resistencia a flexión (UNE-EN 13279-2)

Siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 13279-2:2014 “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo”, se determina la carga necesaria para romper una probeta prismática de 160x40x40mm apoyada sobre rodillos cuyos centros están separados 100mm. La probeta se coloca sobre los rodillos del dispositivo de flexión y mediante un dispositivo central se aplica una carga hasta la rotura. Se anota la carga en Newtons que soporta la probeta.

La resistencia a flexión viene se obtiene con la siguiente formula:

$$R_F = 0,00234 \times F$$

donde,

R_F es la resistencia a flexión en MPa

F es la carga máxima en la rotura en KN

4.3.1.3 Ensayo de resistencia a compresión (UNE-EN 13279-2)

Siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 13279-2:2014 “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo”, se determina la resistencia a compresión aplicando una carga a uno de los dos trozos procedentes del ensayo a flexión. El otro se utiliza para la realización de los ensayos de dureza.

El trozo de la probeta se coloca con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero que ejercen la compresión. De este modo los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde están en contacto con la prensa en una superficie de contacto de 40x40mm.

El plato superior es articulado de modo que permite su inclinación para establecer un contacto perfecto entre las caras de la probeta y los platos de la prensa de compresión. El eje de rotación del plato superior está perfectamente centrado sobre la superficie de la probeta para evitar la excentricidad de la carga, la cual se aplica hasta la rotura de la probeta.

La resistencia a compresión viene se obtiene con la siguiente formula:

$$R_F = F \times 1000 / 1600$$

donde,

R_F es la resistencia a compresión en MPa

F es la carga máxima en la rotura en KN

4.3.1.4 Ensayo de dureza Brinell

Siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 13279-2:2014 “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo”, se determina la huella dejada por una fuerza determinada sobre la probeta de ensayo.

El dispositivo aplica una bola de acero endurecido de 10mm de diámetro en un punto fijo de una de las superficies laterales de la probeta y ejerce una carga fija sobre dicha bola de forma perpendicular a la superficie de la probeta. Con un comparador se determina la profundidad de la huella. Para este ensayo se utiliza uno de los trozos resultantes del ensayo a flexión.

El ensayo se realiza sobre las dos caras longitudinales laterales, las que están en contacto con el molde. Se aplica la carga en 3 puntos separados como mínimo a una distancia de 20mm de los bordes y entre sí. Se aplica una carga de 10N y en 2s se incrementa hasta $200N \pm 10N$. Se mantiene la carga durante 15s; a continuación, se mide la profundidad de la huella.

La dureza H, en N/mm² viene dada por la fórmula:

$$H = F / (\pi \times D \times t) = 200 / (\pi \times 10 \times t) = 6,366 / t$$

donde,

F es la carga en N

D es el diámetro del penetrador en mm

t es la profundidad de la huella mm

4.3.1.5 Ensayo de dureza Shore

El durómetro Shore se emplea para medir la resistencia de un material a la penetración permanente siguiendo las directrices de la norma UNE 102039:1985 “Yesos y escayolas de construcción. Determinación de la dureza Shore C, y de la dureza Brinell”.

La escala de dureza fue definida por Albert F. Shore en la década de 1920. De las diferentes escalas, la más común para conglomerantes es la escala C. La medida final depende de la profundidad con que penetre el cono del indicador, si llega hasta 2,54 (una pulgada) la medida será cero, y será necesario emplear una escala menor. Si la punta no llega a penetrar del todo, la medida será 100 y se debería buscar una escala superior.

La dureza se indica en unidades Shore C en una escala de 0 a 100. La fuerza que se aplica para una dureza 100 es de 44,5N. Las medidas han de efectuarse sobre dos caras longitudinales de la probeta, con la precaución de colocar la probeta sobre una superficie estable. Hay que asegurarse de que las superficies a medir estén tan planas y lisas, secas y exentas de eflorescencia o de partículas de cal. Se toman como mínimo 5 valores por cada cara. En caso de grandes diferencias con respecto al valor medio, se repite la medida.

En nuestro caso empleamos la escala D tanto para las probetas de la muestra 1 como para las probetas de la muestra 3.

4.3.2 Resultados

4.3.2.1 Ensayo de ultrasonidos

4.3.2.1.1 Muestra 1

Tabla 6: resultados ensayo de ultrasonidos - muestra 1

PROBETA	TIEMPO (s)	VELOCIDAD (m/s)	
1	1.1	81,80	1955,99
	1.2	83,00	1927,71
	1.3	83,00	1927,71
2	2.1	83,00	1927,71
	2.2	83,90	1907,03
	2.3	82,50	1939,39
3	3.1	84,50	1893,49
	3.2	83,60	1913,88
	3.3	86,70	1845,44
4	4.1	83,60	1913,88
	4.2	83,90	1907,03
	4.3	83,40	1918,47
5	5.1	82,40	1941,75
	5.2	82,70	1934,70
	5.3	82,40	1941,75
6	6.1	83,50	1916,17
	6.2	83,00	1927,71
	6.3	83,90	1907,03
7	7.1	84,40	1895,73
	7.2	83,40	1918,47
	7.3	82,90	1930,04
8	8.1	87,40	1830,66
	8.2	84,40	1895,73
	8.3	86,50	1849,71
9	9.1	84,90	1884,57
	9.2	82,80	1932,37
	9.3	84,70	1889,02
10	10.1	83,70	1911,59
	10.2	83,00	1927,71
	10.3	84,50	1893,49
11	11.1	81,40	1904,18
	11.2	82,70	1874,24
	11.3	82,80	1871,98
12	12.1	83,90	1907,03
	12.2	84,60	1891,25
	12.3	83,90	1907,03
	83,67	1906,87	

4.3.2.1.2 Muestra 3

Tabla 7: resultados ensayo de ultrasonidos - muestra 3

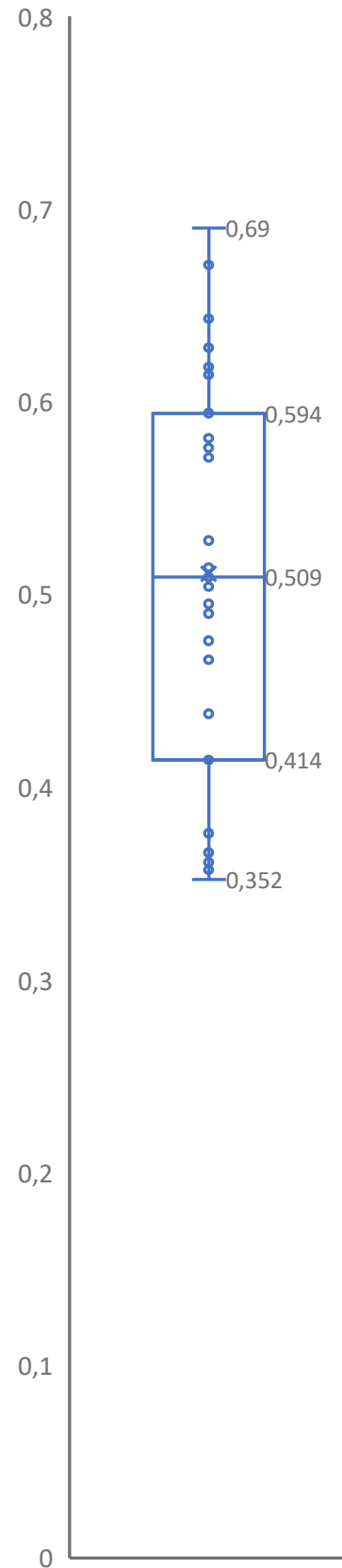
PROBETA		TIEMPO	VELOCIDAD
1	1.1	79,3	1970
	1.2	76,6	2040
	1.3	80,3	1940
2	2.1	82,7	1940
	2.2	83,6	1910
	2.3	83,9	1910
3	3.1	79,8	2010
	3.2	78,9	2030
	3.3	81	1980
4	4.1	79,7	1950
	4.2	79	1980
	4.3	80,5	1940
5	5.1	81,6	1960
	5.2	81,8	1960
	5.3	82,8	1930
6	6.1	79,4	2020
	6.2	79,7	2010
	6.3	80,9	1980
7	7.1	79,8	2010
	7.2	81,8	1960
	7.3	80,9	1980
8	8.1	80,3	1990
	8.2	85,5	1870
	8.3	81	1980
		80,82	1967,92

4.3.2.2 Ensayo de resistencia a flexión (UNE-EN 13279-2)

4.3.2.2.1 Muestra 1

Tabla 8: resultados ensayo de flexión - muestra 1

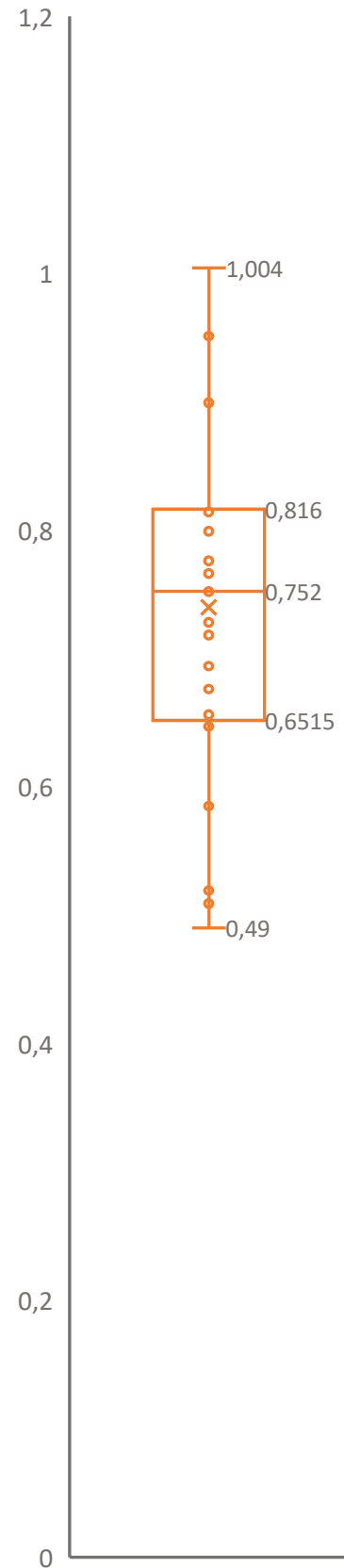
PROBETA		ENSAYO (KN)	TENSION (MPa)
1	1.1		
	1.2	1,073	0,671
	1.3	0,951	0,594
2	2.1	0,814	0,509
	2.2	0,989	0,618
	2.3	0,563	0,352
3	3.1	0,822	0,514
	3.2	1,028	0,643
	3.3	0,601	0,376
4	4.1	0,700	0,438
	4.2	0,792	0,495
	4.3	0,571	0,357
5	5.1	0,578	0,361
	5.2	0,586	0,366
	5.3	0,845	0,528
6	6.1	0,746	0,466
	6.2	0,929	0,581
	6.3	1,104	0,690
7	7.1	0,601	0,376
	7.2	0,913	0,571
	7.3	1,005	0,628
8	8.1	0,586	0,366
	8.2	0,807	0,504
	8.3		
9	9.1		
	9.2		
	9.3		
10	10.1	0,822	0,514
	10.2	0,761	0,476
	10.3	0,921	0,576
11	11.1	0,792	0,495
	11.2	0,921	0,576
	11.3	0,662	0,414
12	12.1	0,784	0,490
	12.2	1,073	0,671
	12.3	0,982	0,614
		0,782	0,489



4.3.2.2.2 Muestra 3

Tabla 9: resultados ensayo de flexión - muestra 3

PROBETA	ENSAYO (KN)	TENSION (MPa)
1	1.1	1,302
	1.2	1,241
	1.3	1,149
2	2.1	1,248
	2.2	0,784
	2.3	0,936
3	3.1	1,081
	3.2	1,606
	3.3	
4	4.1	1,530
	4.2	1,279
	4.3	1,225
5	5.1	1,165
	5.2	1,111
	5.3	1,203
6	6.1	1,050
	6.2	
	6.3	1,309
7	7.1	1,035
	7.2	
	7.3	1,522
8	8.1	1,439
	8.2	0,814
	8.3	0,830
1,138		0,712

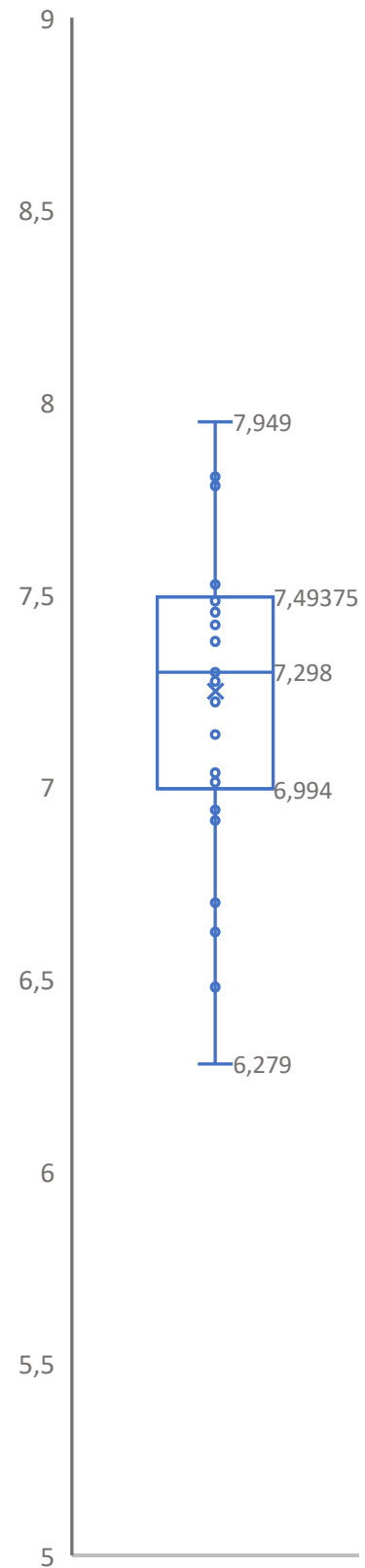


4.3.2.3 Ensayo de resistencia a compresión (UNE-EN 13279-2)

4.3.2.3.1 Muestra 1

Tabla 10: resultados ensayo de compresión - muestra 1

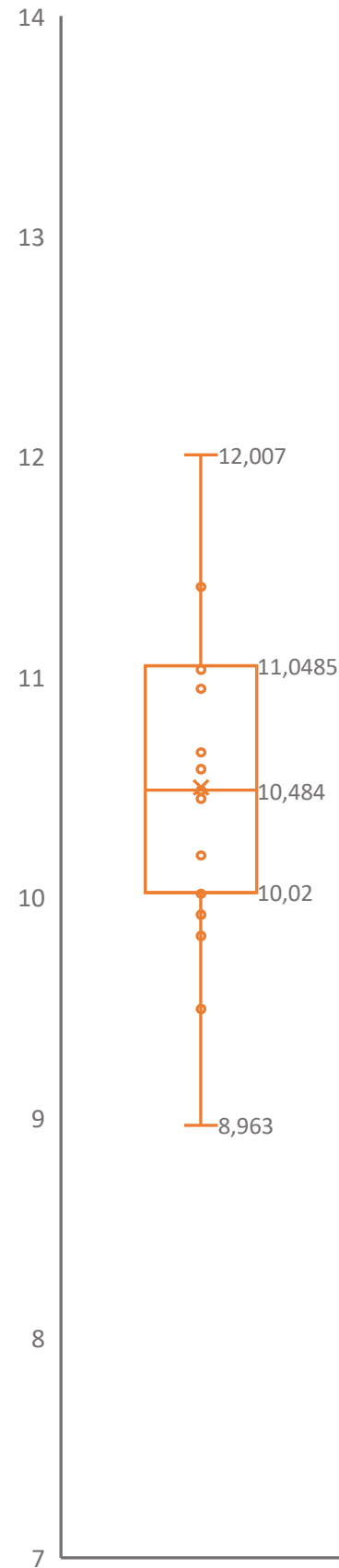
PROBETA	ENSAYO (KN)	TENSION (MPa)	
1	1.1		
	1.2	12,460	7,788
	1.3	11,874	7,421
2	2.1	11,683	7,302
	2.2	11,927	7,454
	2.3	11,706	7,316
3	3.1	11,158	6,974
	3.2	11,219	7,012
	3.3	10,595	6,622
4	4.1	11,250	7,031
	4.2	10,047	6,279
	4.3	11,638	7,274
5	5.1	12,041	7,526
	5.2	11,257	7,036
	5.3	12,490	7,806
6	6.1	11,653	7,283
	6.2	12,453	7,783
	6.3	11,805	7,378
7	7.1	11,417	7,136
	7.2	10,717	6,698
	7.3	11,059	6,912
8	8.1		
	8.2	10,367	6,479
	8.3		
9	9.1		
	9.2		
	9.3		
10	10.1	10,717	6,698
	10.2	12,460	7,788
	10.3	11,676	7,298
11	11.1	12,719	7,949
	11.2	11,554	7,221
	11.3	11,676	7,298
12	12.1	12,521	7,826
	12.2	11,828	7,393
	12.3	11,973	7,483
11,559		7,224	



4.3.2.3.1 Muestra 3

Tabla 11: resultados ensayo de compresión - muestra 3

PROBETA	ENSAYO (KN)	TENSION (MPa)
1	1.1	16,042
	1.2	16,928
	1.3	16,303
2	2.1	17,651
	2.2	16,067
	2.3	16,060
3	3.1	18,252
	3.2	18,252
	3.3	
4	4.1	15,717
	4.2	17,049
	4.3	15,870
5	5.1	16,022
	5.2	14,340
	5.3	17,704
6	6.1	16,714
	6.2	
	6.3	16,775
7	7.1	19,211
	7.2	
	7.3	16,813
8	8.1	15,185
	8.2	18,252
	8.3	17,514
16,718		10,449



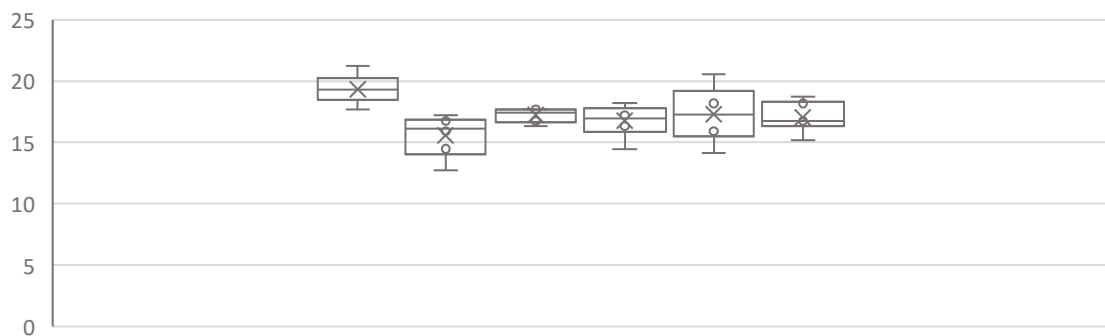
4.3.2.4 Ensayo de dureza Brinell

4.3.2.4.1 Muestra 1

Tabla 12: resultados ensayo de dureza Brinell - muestra 1

PROBETA	CARA 1			MEDIA	CARA 2			MEDIA	MEDIA TOTAL
1.2	19,89	21,22	19,89	20,31	17,68	18,72	18,72	18,36	19,288
3.2	15,92	16,75	14,47	15,66	12,73	17,21	16,32	15,16	15,402
6.2	17,68	16,75	17,68	17,36	17,68	16,32	17,21	17,05	17,204
6.3	18,19	14,47	16,75	16,32	17,68	16,32	17,21	17,05	16,679
7.3	14,15	18,72	16,32	16,18	15,92	18,19	20,54	18,02	17,053
12.2	16,75	16,75	18,72	17,36	18,19	15,16	16,75	16,61	16,975

17,026



La dureza H, en N/mm² viene dada por la fórmula:

$$H = F / (\pi \times D \times t) = 200 / (\pi \times 10 \times t) = 6,366 / t$$

Tenemos una huella media de 0,37mm y calculamos la dureza superficial Brinell con ese valor:

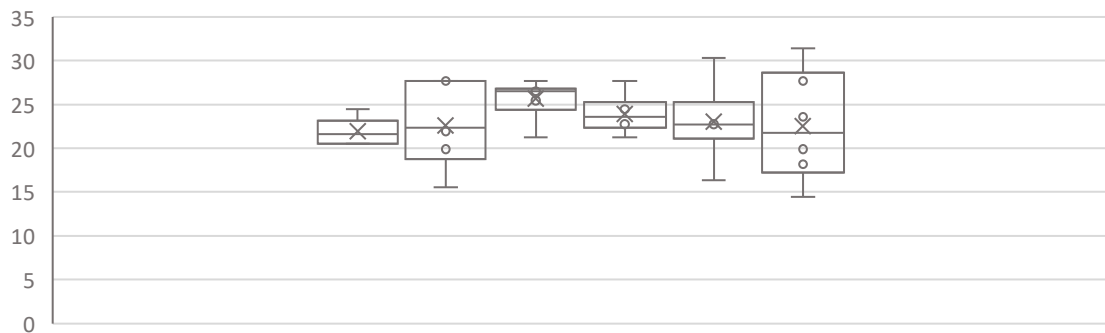
$$H = 6,366 / 0,370 = 17,213$$

4.3.2.4.2 Muestra 3

Tabla 13: resultados ensayo de dureza Brinell - muestra 3

PROBETA	CARA 1			MEDIA	CARA 2			MEDIA	MEDIA TOTAL
2.2	21,22	21,95	22,74	21,95	20,54	20,54	24,48	21,70	21,826
4.1	21,95	19,89	27,68	22,74	15,53	22,74	27,68	20,76	21,702
5.1	25,46	26,53	26,53	26,16	26,53	21,22	27,68	24,80	25,464
5.2	22,74	22,74	27,68	24,17	24,48	24,48	21,22	23,29	23,724
6.3	30,31	22,74	22,74	24,80	16,32	22,74	23,58	20,32	22,337
7.2	23,58	31,83	19,89	24,17	27,68	18,19	14,47	18,72	21,103

22,601



La dureza H, en N/mm² viene dada por la fórmula:

$$H = F / (\pi \times D \times t) = 200 / (\pi \times 10 \times t) = 6,366 / t$$

Tenemos una huella media de 0,27mm y calculamos la dureza superficial Brinell con ese valor:

$$H = 6,366 / 0,273 = 22,601$$

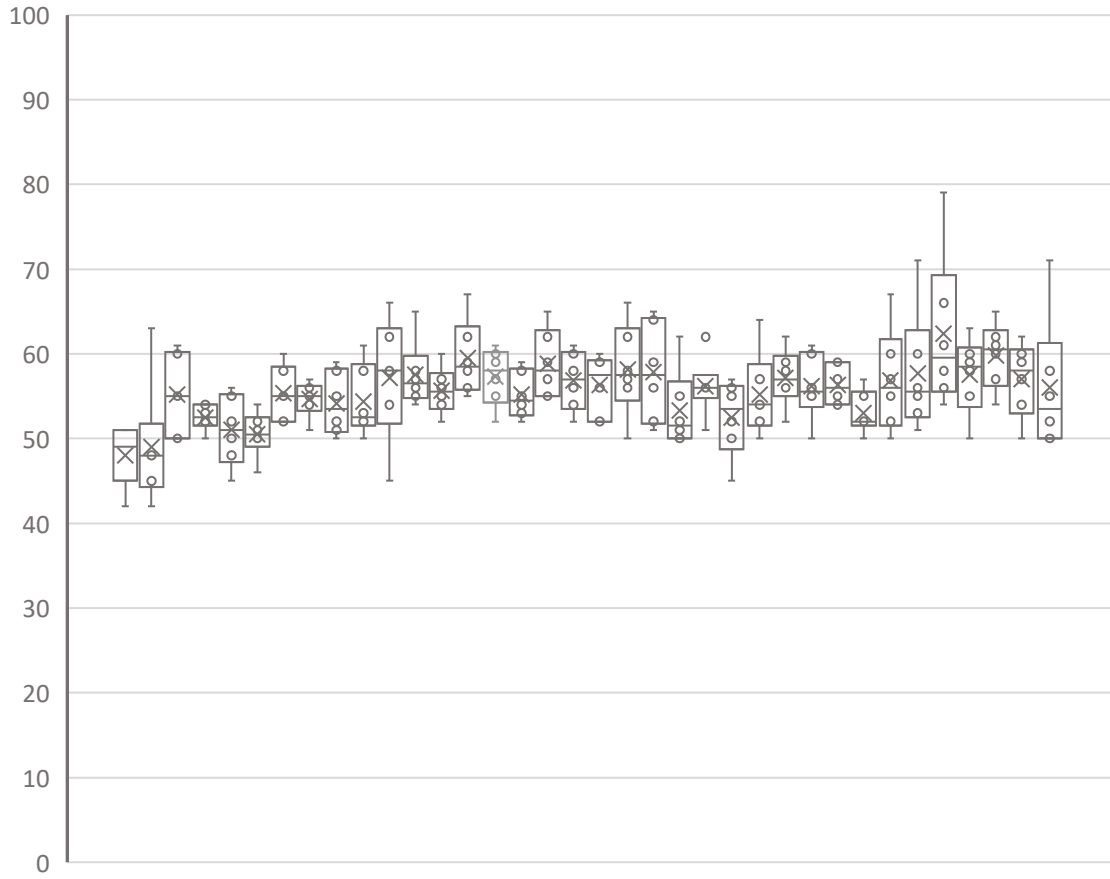
4.3.2.5 Ensayo de dureza Shore

4.3.2.5.1 Muestra 1

Tabla 14: resultados ensayo de dureza Shore - muestra 1

PROBETA	CARA 1			MEDIA	CARA 2			MEDIA	MEDIA TOTAL	GRUPO	
1	1.1	48	46	51	48,25	51	42	50	47,31	47,77	50,08
	1.2	48	45	48	46,96	63	42	48	49,57	48,23	
	1.3	55	50	55	53,23	60	61	50	56,54	54,83	
2	2.1	52	54	54	53,32	53	52	50	51,64	52,46	51,17
	2.2	48	52	56	51,79	55	50	45	49,67	50,71	
	2.3	46	51	52	49,52	50	50	54	51,27	50,38	
3	3.1	52	55	55	53,96	60	58	52	56,46	55,18	54,57
	3.2	54	51	56	53,59	55	55	57	55,65	54,60	
	3.3	50	58	55	54,13	59	51	52	53,78	53,95	
4	4.1	52	58	61	56,75	52	53	50	51,64	54,07	55,87
	4.2	45	58	54	51,74	62	58	66	61,83	56,34	
	4.3	58	56	55	56,31	57	65	54	58,31	57,29	
5	5.1	55	57	54	55,31	56	60	52	55,81	55,56	57,28
	5.2	56	58	62	58,56	55	59	67	59,93	59,24	
	5.3	60	57	55	57,26	59	52	61	57,06	57,16	
6	6.1	58	54	53	54,92	52	55	59	55,19	55,05	56,73
	6.2	55	65	62	60,37	57	59	55	56,95	58,61	
	6.3	54	56	58	55,95	52	60	61	57,37	56,65	
7	7.1	59	52	59	56,47	56	60	52	55,81	56,14	57,06
	7.2	50	58	57	54,76	62	56	66	61,05	57,74	
	7.3	59	65	64	62,55	52	51	56	52,91	57,33	
8	8.1	52	62	51	54,58	55	50	50	51,56	53,03	53,68
	8.2	51	56	56	54,23	56	56	62	57,87	55,99	
	8.3	57	56	55	55,99	45	50	52	48,82	52,16	
9	9.1	54	57	64	58,04	52	50	54	51,95	54,83	55,90
	9.2	58	62	59	59,62	56	52	56	54,60	57,00	
	9.3	55	60	50	54,70	56	61	55	57,22	55,93	
10	10.1	59	57	55	56,95	59	54	54	55,57	56,25	55,11
	10.2	52	57	55	54,59	52	50	52	51,32	52,90	
	10.3	60	52	67	59,03	55	50	57	53,84	56,31	
11	11.1	60	55	56	56,92	51	71	53	57,08	57,00	58,44
	11.2	66	79	58	66,59	61	54	56	56,85	61,34	
	11.3	55	63	58	58,48	59	50	60	55,95	57,19	
12	12.1	54	62	60	58,46	57	65	61	60,82	59,62	57,11
	12.2	59	60	57	58,64	50	54	62	54,90	56,71	
	12.3	71	55	58	60,60	52	50	50	50,65	55,18	

55,14

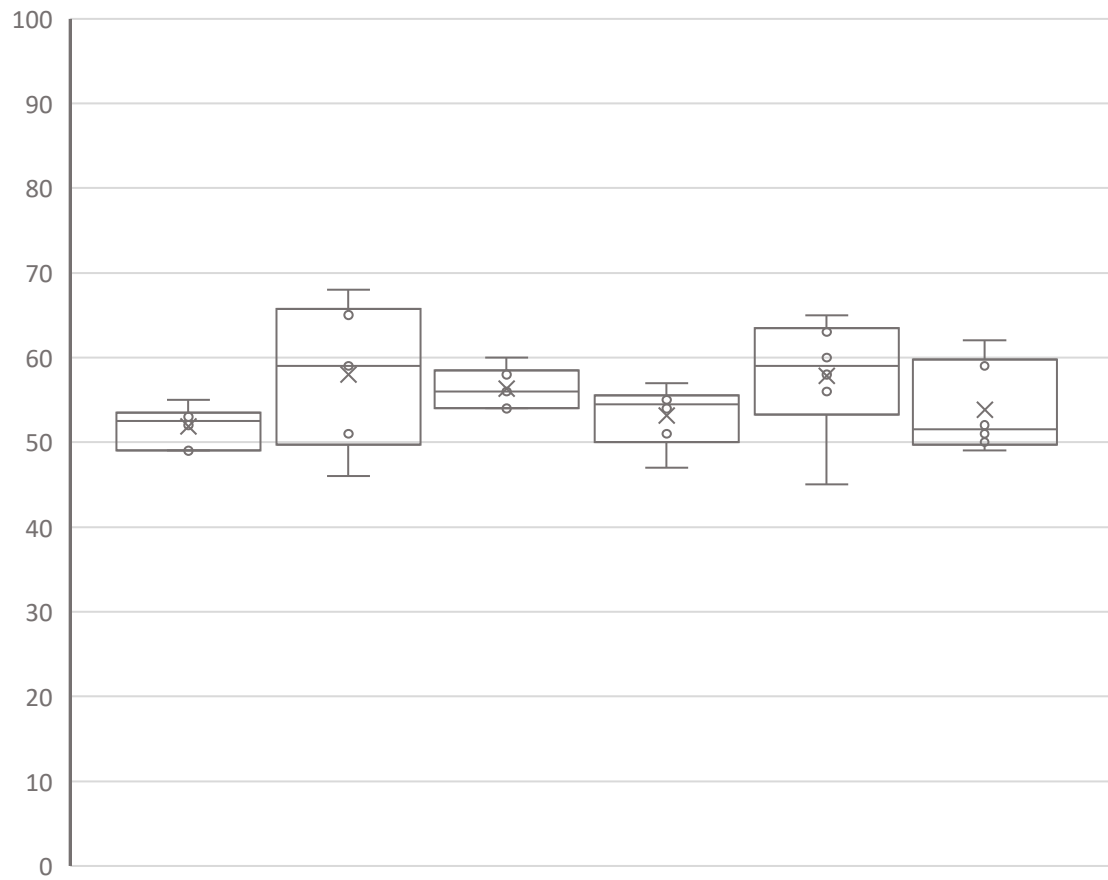


4.3.2.5.2 Muestra 3

Tabla 15: resultados ensayo de dureza Shore - muestra 3

PROBETA	CARA 1			MEDIA	CARA 2			MEDIA	MEDIA TOTAL
1.2	55	49	49	50,85	52	53	53	52,66	51,74
3.2	68	59	51	58,52	59	46	65	55,48	56,96
5.1	56	56	54	55,32	58	54	60	57,22	56,25
5.3	55	47	57	52,63	51	55	54	53,28	52,95
7.1	60	45	56	52,87	65	63	58	61,86	57,01
8.3	59	49	51	52,66	62	50	52	54,19	53,42

56,07



4.3.3 Análisis de los resultados

Se comparan los resultados de los ensayos de propiedades físicas y mecánicas. Se cotejan los resultados de las muestras 1 y 3, se trata de dos muestras de yeso fraguado, muestras formadas principalmente por yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Analizando visualmente el conjunto total de probetas, todas tienen la misma calidad y acabado.

4.3.3.1 Ensayo de ultrasonidos

En el grupo de probetas de la muestra 1 se observa una velocidad media de transmisión del sonido de 1906,87m/s, con un tiempo medio empleado en recorrer la probeta de 83,67 μs .

En el grupo de probetas de la muestra 3 se observa una velocidad media de transmisión del sonido de 1967,92m/s, con un tiempo medio empleado en recorrer la probeta de 80,82 μs .

Los dos grupos de probetas presentan valores similares en cuanto a velocidad media de transmisión de sonido y tiempo empleado en conseguirlo, esto nos indica que la composición y la densidad en ambos grupos es similar. Los dos grupos presentan una proporción de huecos parecida, se trata de probetas de la misma calidad de tal manera que podemos seguir comparando los resultados de los siguientes ensayos.

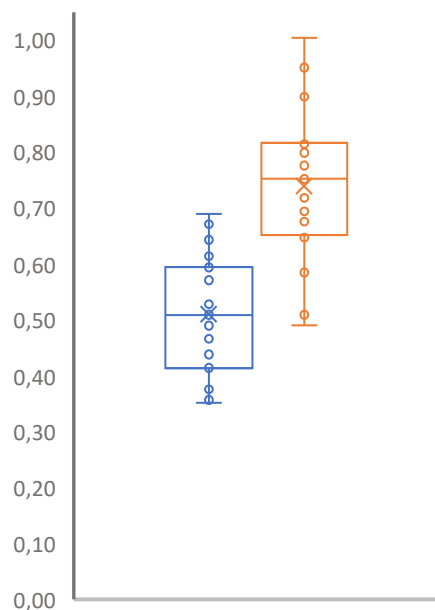
4.3.3.2 Ensayo de resistencia a flexión (UNE-EN 13279-2)

Las probetas de la muestra 1, yeso de primera mano, reflejan un valor medio de resistencia a flexión de 0,489MPa, con un valor máximo de 0,690MPa y un mínimo de 0,352MPa.

Las probetas de la muestra 3, yeso regenerado, reflejan un valor medio de resistencia a flexión de 0,712MPa, con un valor máximo de 1,004MPa y un mínimo de 0,490MPa.

Las probetas de la muestra 3 resisten a flexión el doble que las probetas de la muestra 1. Tratándose de probetas de la misma calidad y con acabados similares las probetas de yeso regenerado resisten más a flexión.

Tabla 16: comparación ensayo de flexión



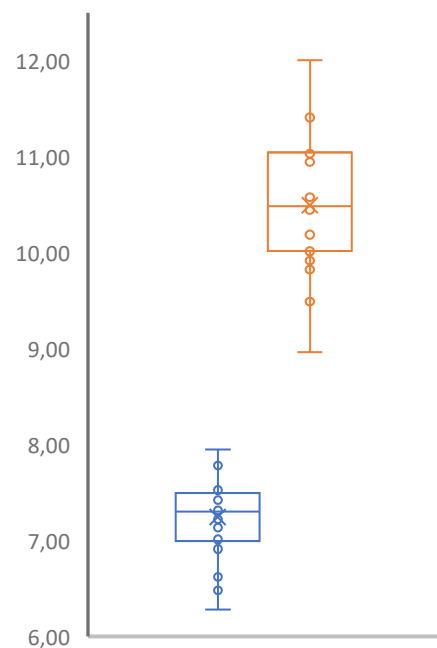
4.3.3.3 Ensayo de resistencia a compresión (UNE-EN 13279-2)

En el grupo de probetas de la muestra 1 se obtiene un resultado medio de resistencia a compresión de 7,224MPa, con un valor máximo de 7,949MPa y un mínimo de 6,279MPa.

En el grupo de probetas de la muestra 3 se obtiene un resultado medio de resistencia a compresión de 10,449MPa, con un valor máximo de 12,007MPa y un mínimo de 8,963MPa.

Respecto a la compresión las probetas de la muestra 3 también son más resistentes a compresión que las de la muestra 1. Se observa que todas las probetas de la muestra 3 presentan valores de resistencia a compresión por encima de las probetas de la muestra 1. El yeso regenerado tiene una mayor capacidad de compresión que el yeso de primera mano.

Tabla 17: comparación ensayo de compresión



4.3.3.4 Ensayo de dureza Brinell

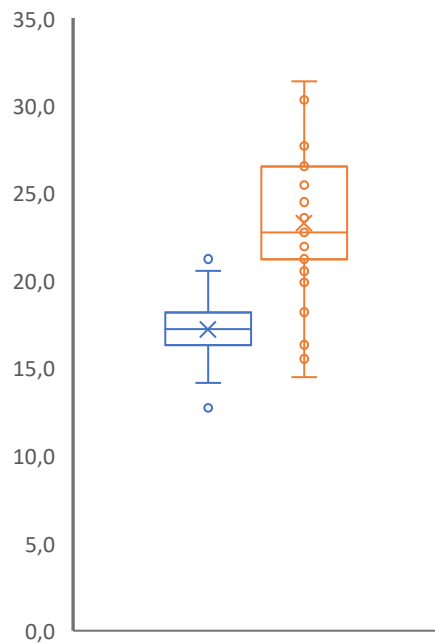
Para los ensayos de dureza Brinell se duplican las pruebas que requiere la norma, realizando 3 pruebas en dos caras para cada una de las 6 probetas. Obtenemos 36 medidas de la muestra 1 y otras 36 de la muestra 3.

En el grupo de probetas de la muestra 1 se obtiene un resultado medio de dureza superficial Brinell de 17,026N/mm², con un valor máximo de 19,288N/mm² y un mínimo de 15,402N/mm².

En el grupo de probetas de la muestra 3 se obtiene un resultado medio de dureza superficial Brinell de 25,464N/mm², con un valor máximo de 21,103N/mm² y un mínimo de 21,103N/mm².

Los resultados de dureza Brinell indican que las probetas de la muestra 3 son más duras que las probetas de la muestra 1, con todos los valores de la muestra 3 por encima de los valores de muestra 1. El yeso regenerado presenta superficies y acabados más duros que las de yeso de primera mano.

Tabla 18: comparación ensayo de dureza Brinell



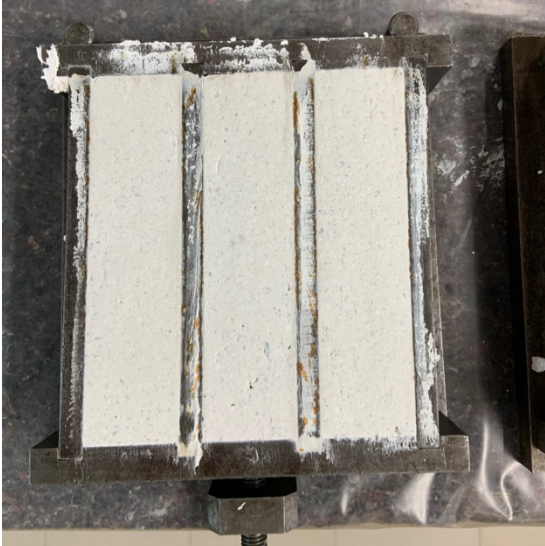
4.3.3.5 Ensayo de dureza Shore

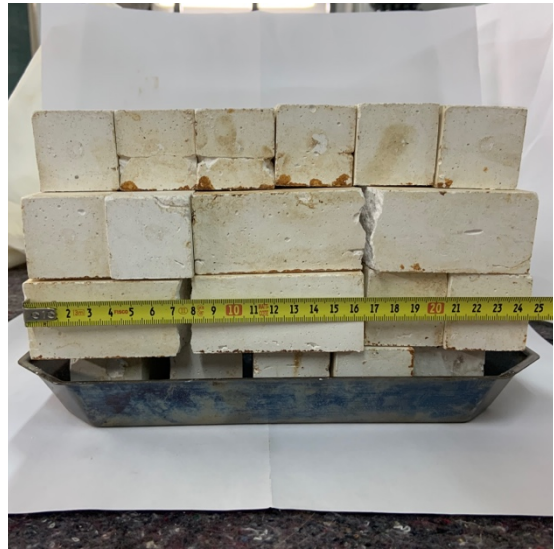
Los resultados de los ensayos de dureza Shore corroboran los resultados obtenidos en los ensayos de dureza Brinell. Para las probetas de la muestra 1 se han realizado ensayos en todas las probetas, 3 pinchazos por cara, en dos caras por probeta. Para las probetas de la muestra 3 se han realizado ensayos en 6 probetas, simplificando así el proceso, obteniendo resultados con la misma fiabilidad.

En el grupo de probetas de la muestra 1 se obtiene un resultado medio de dureza superficial Shore 55,14 de con un valor máximo de 58,44 y un mínimo de 50,08.

En el grupo de probetas de la muestra 3 se obtiene un resultado medio de dureza superficial Shore 56,07 de con un valor máximo de 57,01 y un mínimo de 51,74.

En este caso los valores son similares. Las probetas de la muestra 1 presentan resultados ligeramente inferiores a los de la muestra 3.







5. CONCLUSIONES

Como conclusión, es importante comentar, que el estudio se realiza con unas condiciones de partida muy específicas.

La temperatura de coacción del horno de laboratorio se fija en 250°C máximo, con una cocción de 24 horas, enfriado controlado durante un día completo y encendido progresivo durante una hora hasta llegar a la temperatura fijada. De esta manera se busca conseguir una cocción lo más tradicional posible con las condiciones de laboratorio. Se establece una granulometría máxima de 2mm para el tamaño de las partículas empleadas en el estudio, comprobándose en cada uno de los ciclos. Las condiciones de secado y fraguado de las probetas se llevan a cabo en un espacio cubierto, con temperatura y humedad ambiente, aislado de la lluvia y del sol.

Con los resultados aquí expuestos, se demuestra la hipótesis propuesta al principio de este estudio, el yeso tradicional se puede regenerar cíclicamente creando un material de cero residuos, que no solo mantiene sus propiedades físicas, si no que las mejora con cada ciclo.

La hipótesis que explica esta mejora consiste en cantidad de material que se transforma durante el ciclo yeso-anhidrita. Como se puede observar en los resultados del del ensayo de difracción de Rayos X:

1. Muestra 0: Partimos de un material que ya ha pasado por el horno, cuenta con un 91% de anhidrita, es decir, durante la cocción en el horno tradicional (alrededor de 1000°C) se eliminan la mayoría de las moléculas de agua del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) transformándolo en anhidrita (CaSO_4).
2. Muestra 1: Se trata de una muestra de yeso fraguado, al material de la muestra 0 se le ha añadido agua y ha reaccionado transformado gran parte de la anhidrita en yeso. Con este proceso hemos conseguido transformar un 50% del material.
3. Muestra 2: En la segunda cocción, con un horno eléctrico en laboratorio, no conseguimos eliminar tanta agua como con el horno tradicional, resultando un material con un 27% de basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sulfato de calcio hemihidratado, partículas que han perdido parte de moléculas de agua, y un 71% de anhidrita (CaSO_4) sulfato cálcico. Un 20% menos que en la primera cocción.
4. Muestra 3: Por último, con la última mezcla, al tener un mayor porcentaje de partículas con media molécula de agua, la transformación de este en yeso es más sencilla y conseguimos un material con un 67% de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sulfato cálcico dihidratado.

Cuanta mayor parte del material se encuentre transformado en yeso, más resistente será el material.

Con estas transformaciones se observa también un cambio en el color superficial de las probetas, del mismo modo que ocurre con el papel reciclado, con los ciclos va perdiendo la blancura del material original. Bien es cierto que el yeso tradicional no cuenta con un blanco puro como el yeso industrial.

Con el fin de este estudio se abre la puerta a la inclusión del yeso tradicional en la arquitectura vigente. Descubriendo un material que requiere menor consumo energético en su elaboración y de residuo cero.

REFERENCIAS

AMADOR BLANCO, J.J. y UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA TÉCNICA, 1991. Materiales de construcción : control de calidad : yesos y escayolas. Madrid: UPM, E. U. de Arquitectura Técnica. ISBN 84-604-0538-9.

ARREDONDO Y VERDÚ, F. y INSTITUTO TÉCNICO DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL CEMENTO, 1976. El yeso. 8ª ed. Madrid: Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. ISBN 84-7292-068-2.

ARREDONDO Y VERDÚ, F., 1983. Estudio de materiales. Madrid: Servicio de Publicaciones, [E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos]. ISBN 84-7493-075-8.

ERBS, Alexandre, et al. 2018 Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of cleaner Production*, vol. 183, p. 1314-1322.

ESCAVY, J., HERRERO, M., & ARRIBAS, M. 2012. Gypsum resources of Spain: Temporal and spatial distribution. Elsevier, 73-78.

GERALDO, Rodrigo H., et al. 2017 Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, p. 288-300.

HERO HERNÁNDEZ, A., 1954. Trabajo del yeso y manual del pavimentador. Barcelona: Ossó

LASHERAS MERINO, F., 1989. Modelo teórico de comportamiento mecánico del yeso. Madrid: Félix Lasheras Merino.

LEA, F.M., 1949. El uso del yeso en la construcción: conferencia. Madrid: Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento.

NAVAS, J. R., BALTUILLE MARTÍN, J. ALBERRUCHE DEL CAMPO, E., BEL-IAN BALLESTER, A., CORRAL LLEDÓ, M., MARCHAN SANZ, C., & PÉREZ CERDÁN, F. 2007. *Libro blanco de la minería de Aragón*. Obtenido de http://www.enciclopedia-aragonesa.com/voz.asp?voz_id=8827

SANZ ARAUZ, D. y SEPULCRE AGUILAR, A., 2022. *El yeso en la arquitectura histórica*. Madrid]: UPM Press. ISBN 978-84-18661-16-7.

SANZ ARAUZ, D., VILLANUEVA DOMÍNGUEZ, L. de y LÓPEZ DE ANDRÉS, S., 2009. *Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas*. S.l.: E.T.S. Arquitectura (UPM).

VILLANUEVA, L. de., GARCÍA SANTOS, A. y ATEDY, 2001. *Manual del yeso*. [1ª ed.]. Madrid: CIE Dossat 2000. ISBN 84-95312-46-8.

VILLANUEVA, L. de., 1975. Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción. S. l: s. n.]

VOLKART, K., 1971. Gips-Worterbuch = Dictionnaire du gypse et du plâtre = Gypsum and plaster dictionary: deutsch, englisch, französisch = allemand, anglais, francais = german, english, french. Paris [etc.: Eyrolles.