

# **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

## FABRICACIÓN DE PIEDRA ARTIFICIAL A PARTIR DE VIDRIO ELÉCTRICO RECICLADO



Universidad de La Laguna

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Universidad de La Laguna (Julio 2016)

**Autor: Fernando de Fuentes Perera**

**Tutores: María Hernández Molina**

**José Miguel Cáceres Alvarado**



## **AGRADECIMIENTOS:**

Dar las gracias a todas aquellas personas que de manera desinteresada han colaborado en la elaboración de este proyecto, así como a Manolo Torres y a Milagros Laz Pavón de los laboratorios de Baja Frecuencia y del Laboratorio de Materiales.

También agradecer a mis padres, los cuales me han apoyado durante todos estos años a pesar de las adversidades.



# ÍNDICE DE CONTENIDO

PARTE I: MEMORIA.....	11
<b>1. Objeto y alcance .....</b>	<b>12</b>
1.1. Español .....	12
1.2. English .....	13
<b>2. Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>3. Antecedentes.....</b>	<b>16</b>
3.1. Proceso de elaboración en grandes industrias (Silestone Cosentino).....	16
<b>4. Materias primas.....</b>	<b>18</b>
4.1. Vidrio técnico .....	18
4.1.1. Propiedades del vidrio técnico .....	19
4.1.2. Procesamiento del residuo de vidrio .....	20
4.2. Aglomerante (SuperSap 100/1000, EntropyResins) .....	23
4.2.1. Resina epóxica .....	24
4.2.1.1. Propiedades de la resina epóxica.....	24
4.2.2. Catalizador .....	24
4.3. Cera (TR104 Carnauba, ResinEco) .....	25
4.4. Alcohol polivinílico (IP3000, ResinEco).....	25
4.5. Colorantes .....	26
<b>5. Moldes.....</b>	<b>26</b>
5.1. Molde Vacío (MV).....	26
5.1.1. Bomba de vacío .....	28
5.2. Molde Polietileno (MP) .....	28
5.2.1. Sistema de presiones alternativo .....	29
<b>6. Elaboración de las probetas .....</b>	<b>30</b>
6.1. Fabricación y curado de la masa .....	31
6.2. Probetas Molde Vacío (PMV) .....	32
6.2.1. Preparación del molde y compactación de la masa .....	33
6.2.2. Proceso de curado .....	34
6.2.3. Desmolde y resultados .....	35
6.2.4. Análisis de fallos .....	36
6.3. Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	37
6.3.1. Preparación del molde y compactación de la masa .....	38
6.3.2. Proceso de curado .....	39
6.3.3. Desmolde y resultados .....	40
6.3.4. Análisis de fallos .....	41
<b>7. Ensayos.....</b>	<b>42</b>
7.1. Microscopía digital .....	43
7.2. Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (UNE-EN 14617-1) .....	43
7.2.1. Acondicionamiento de las probetas .....	44
7.2.2. Descripción del ensayo .....	44

7.2.3.	Desarrollo del ensayo.....	46
7.3.	Determinación de la resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2) .....	47
7.3.1.	Acondicionamiento de las probetas .....	48
7.3.2.	Descripción del ensayo .....	50
7.3.3.	Desarrollo del ensayo.....	52
7.4.	Determinación de la dureza Knoop (UNE-EN 14205) .....	54
7.4.1.	Acondicionamiento de las probetas .....	55
7.4.2.	Descripción del ensayo .....	57
7.4.3.	Desarrollo del ensayo.....	58
7.5.	Determinación de la resistencia al choque térmico (UNE-EN 14617-6) .....	59
7.5.1.	Acondicionamiento de las probetas .....	60
7.5.2.	Descripción del ensayo .....	60
7.5.3.	Desarrollo del ensayo.....	61
7.6.	Determinación de la resistividad eléctrica.....	61
7.6.1.	Acondicionamiento de las probetas .....	62
7.6.2.	Descripción del ensayo .....	62
7.6.3.	Desarrollo del ensayo.....	64
<b>8.</b>	<b>Protección individual .....</b>	<b>64</b>
<b>9.</b>	<b>Resultados de los ensayos y análisis de resultados .....</b>	<b>65</b>
9.1.	Microscopía digital.....	65
9.1.1.	Probetas Molde Vacío (PMV) .....	65
9.1.2.	Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	66
9.2.	Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (UNE-EN 14617-1) .....	66
9.2.1.	Probetas Molde Vacío (PMV) .....	68
9.2.2.	Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	68
9.2.3.	Conclusiones tras el ensayo .....	69
9.3.	Determinación de la resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2) .....	69
9.3.1.	Probetas Molde Vacío (PMV) .....	71
9.3.2.	Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	73
9.3.3.	Conclusiones tras el ensayo .....	74
9.4.	Determinación de la dureza Knoop (UNE-EN 14205) .....	74
9.4.1.	Probetas Molde Vacío (PMV) .....	75
9.4.2.	Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	75
9.4.3.	Conclusiones tras el ensayo .....	76
9.5.	Determinación de la resistencia al choque térmico (UNE-EN 14617-6) .....	76
9.5.1.	Probetas Molde Vacío (PMV) .....	77
9.5.2.	Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	77
9.5.3.	Conclusiones tras el ensayo .....	77
9.6.	Determinación de la resistividad eléctrica.....	78
9.6.1.	Probetas Molde Vacío (PMV) .....	79
9.6.2.	Probetas Molde Polietileno (PMP) .....	79
9.6.3.	Conclusiones tras el ensayo .....	79
<b>10.</b>	<b>Resumen de resultados y comparativas.....</b>	<b>80</b>
10.1.	Resumen de resultados.....	80
10.2.	Comparativa con valores comerciales.....	82
<b>11.</b>	<b>Conclusiones globales.....</b>	<b>83</b>

11.1.	Español.....	83
11.2.	English.....	84
<b>12.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>86</b>
PARTE II:	ANEXOS .....	89
ANEXO I:	FOTOGRAFICO Y MICROSCOPIA DIGITAL .....	90
ANEXO II:	DATOS INDIVIDUALES DE LAS PROBETAS.....	99
ANEXO III:	RESULTADOS INDIVIDUALES DEL ENSAYO A FLEXION .....	102
ANEXO IV:	TABLAS DE DENSIDAD APARENTE Y ABSORCION DE AGUA.....	108
ANEXO V:	TABLAS DE DUREZA KNOOP.....	114
ANEXO VI:	TABLAS COMPARATIVAS DE CHOQUE TERMICO.....	118
ANEXO VII:	TABLAS DE RESISTIVIDAD ELCTRICA.....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I. Acabados de encimeras elaboradas por Silestone Cosentino a partir de residuos .....	14
Figura II. Depósito de televisores y monitores de CRT en Zhuzhou (China) .....	15
Figura III. CRT-P y CRT-F .....	18
Figura IV. Gráfica comparativa de difracción de rayos X .....	19
Figura V. Cadena de procesado de vidrio .....	20
Figura VI. Trituradora de mandíbulas .....	21
Figura VII. Trituradora de rodillos .....	21
Figura VIII. Vidrio a la salida de la trituradora de rodillos.....	22
Figura IX. Tamices para la separación de polvo de vidrio .....	22
Figura X. Almacenamiento de polvo de vidrio según su granulometría y procedencia.....	23
Figura XI. Resina epóxica y catalizador .....	23
Figura XII. Cera desmoldante .....	25
Figura XIII. Alcohol polivinílico .....	25
Figura XIV. Pastas pigmentadas verde y blanca.....	26
Figura XV. Molde Vacío (MV).....	27
Figura XVI. Bomba de vacío .....	28
Figura XVII. Molde Polietileno (MP).....	29
Figura XVIII. Sistema de presiones alternativo .....	29
Figura XIX. Rosca y empuñadura de mariposa.....	30
Figura XX. Serie 1 preparada para el curado.....	34
Figura XXI. Molde Vacío durante el curado de la serie 2 .....	35
Figura XXII. Acabados de las series 1, 2, 3 y 4.....	35
Figura XXIII. Series de la 1 a la 4.....	36
Figura XXIV. Filtración de masa en láminas de metal .....	37
Figura XXV. Molde Polietileno preparado para introducir en la estufa .....	39

Figura XXVI. Serie 5 tras realizarse el proceso de curado.....	40
Figura XXVII. Series 5 y 6 tras el desmolde.....	40
Figura XXVIII. Serie 5 tras el desmolde.....	41
Figura XXIX. Burbujas de aire en la parte inferior de la probeta 6-3.....	42
Figura XXX. Microscopio óptico Dino-Lite.....	43
Figura XXXI. Pesa y balanza hidrostática.....	45
Figura XXXII. Instrumento para realizar la pesada bajo el agua.....	47
Figura XXXIII. Serie 6 sumergida.....	47
Figura XXXIV. Modelo elástico lineal.....	48
Figura XXXV. Lijadora utilizada para el acondicionamiento.....	49
Figura XXXVI. Serie 3 tras el proceso de lijado.....	49
Figura XXXVII. Serie 4 tras el proceso de lijado.....	49
Figura XXXVIII. Probeta lista para ser ensayada.....	50
Figura XXXIX. Máquina de ensayos mecánicos AG-IS 50 kN Shimadzu Autograph.....	51
Figura XL. Control de carga configurado para el ensayo.....	53
Figura XLI. Pieza 3-2 justo tras quebrarse durante el ensayo.....	53
Figura XLII. Indentador de diamante Knoop para el ensayo en piedra.....	54
Figura XLIII. Esquema de una muesca resultante tras el ensayo de dureza.....	55
Figura XLIV. Pulidora Struers LaboPol-5.....	55
Figura XLV. Struers Sic-Paper 1000.....	56
Figura XLVI. Paños de fieltro para pasta de alúmina.....	56
Figura XLVII. Comparativa microscópica de probeta 3-5 sin pulir y pulida.....	56
Figura XLVIII. Piezas fracturadas tras el acondicionamiento.....	57
Figura XLIX. Microdurómetro Struers Duramin.....	58
Figura L. Indentación realizada con 0,49 N durante 20 segundos visible en el microscopio.....	59
Figura LI. Probetas acondicionadas para realizar el ensayo.....	62
Figura LII. Circuito preparado para la determinación de la resistividad.....	63

Figura LIII. Esquema eléctrico para la determinación de la resistividad.....	64
Figura LIV. Probeta 3-3, se aprecian ambas tonalidades de vidrio.....	65
Figura LV. Probeta 6-6, se aprecia la cera introducida en la probeta.....	66
Figura LVI. Gráfica comparativa de absorción de agua.....	67
Figura LVII. Gráfica comparativa de densidad aparente .....	68
Figura LVIII. Gráfica comparativa de resistencia a flexión .....	70
Figura LIX. Gráfica comparativa de módulo a flexión .....	71
Figura LX. Probeta 2-2, en la que se aprecia la resina fuera de la masa.....	71
Figura LXI. Gráfica comparativa de ensayo a flexión de la serie 3.....	72
Figura LXII. Gráfica comparativa de ensayo a flexión de la serie 6.....	73
Figura LXIII. Gráfica comparativa de la dureza Knoop media .....	75
Figura LXIV. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica media.....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Propiedades mecánicas del vidrio .....	20
Tabla II. Nomenclatura adoptada para las probetas .....	31
Tabla III. Proporciones de las 4 primeras series .....	33
Tabla IV. Proporciones de las series 5 y 6.....	38
Tabla V. Medidas de densidad aparente y absorción de agua de todas las series.....	67
Tabla VI. Medias y desviaciones típicas de los parámetros MOR y MOE .....	70
Tabla VII. Dureza Knoop media .....	74
Tabla VIII. Medidas de variación de masa y resistencia a flexión de las series 3 y 6.....	76
Tabla IX. Resumen de resistividad eléctrica .....	78
Tabla X. Parámetros medios en Molde Vacío (considerando la serie 2) .....	80
Tabla XI. Parámetros medios en Molde Polietileno .....	80
Tabla XII. Parámetros medios en Molde Vacío (sin considerar la serie 2).....	81
Tabla XIII. Valores comerciales de la Familia II de Silestone Cosentino .....	82



**PARTE I:**  
**MEMORIA**

## 1. Objeto y alcance

### 1.1. Español

El presente proyecto se marca como objetivo asegurar la viabilidad de la fabricación de piedra artificial, susceptible de ser utilizada en encimeras de cocina y/o baños, a partir de materiales destinados para su reciclaje como son los residuos de vidrio generados a partir de pantallas de tubos de rayos catódicos.

El desarrollo del proyecto implica la selección de las materias primas y su posterior tratamiento para conformar la futura piedra en un molde, mediante varias series de “probetas” o muestras, de las cuales se ha variado su composición o su método de fabricación en cada serie.

Se ha intentado que el material resultante sea lo más uniforme y lo más similar posible respecto otras piedras artificiales realizadas con otro tipo de residuos, comparando las propiedades de ambos.

Asimismo, se han estudiado ciertas propiedades de las piedras fabricadas mediante ensayos normalizados. En nuestro caso se realizaron los ensayos necesarios para determinar la resistencia a flexión, la absorción de agua y densidad aparente, así como la resistividad eléctrica, dureza y efecto por choque térmico. Los resultados se han comparado con los valores de productos que actualmente se encuentran en comercialización.

Este proyecto se basa fundamentalmente en los resultados obtenidos en otro proyecto de la Universidad de La Laguna, realizado por María de León González en el año 2015: “*Fabricación de piedra artificial a partir de residuos*” [1].

Como punto de partida se han tenido en cuenta aquellas condiciones que proporcionaron los mejores resultados estructurales, para comenzar el presente proyecto de una manera más efectiva. Igualmente, tras la fabricación y estudio de las primeras series se implementaron ciertas variaciones en el proceso inicial de fabricación de las muestras de piedra para determinar si esto finalmente afecta a su composición estructural.

Para finalizar, se analizarán los resultados y se estudiará la posibilidad de mejorar el proceso de fabricación tras examinar detenidamente los fallos que se han observado, proponiendo dichas mejoras para estudios posteriores.

## 1.2. English

This project has aimed to ensure the viability of manufacturing artificial stone, intended to be used in kitchen countertops and/or bathroom's, from materials deposited for recycling such as electric glass waste from Cathodic Ray Tube screens.

The project involves the selection of raw materials and subsequent processing to shape the future stone into a mold, through several series of "specimens" or samples, of which we will change its composition.

It will be tried that the resulting material be as uniform and similar possible as other artificial stones made with other types of waste, by comparing the properties of both.

In addition, certain properties of the manufactured stones will be studied by standard tests. In our case we will make the necessary tests to determine flexural strength, water absorption and apparent density, electrical resistivity, hardness and thermal shock effect and will compare it with the products that currently are on the market.

This project is mainly based on the results of another project from Universidad de La Laguna, made by María de León González in 2015: "*Fabricación de piedra artificial a partir de residuos*" [1]. From it we will consider those conditions that have produced better structural results as starting point of this project in a more effective way. Certain variations will also be implemented in the initial manufacturing process of stone samples to determine if this will eventually affect its structural composition.

At the end, the results will be analyzed, and it will be studied the possibility of improving the manufacturing process from a detailed examination of the failures that have been observed, suggesting such improvements for further studies.

## 2. Introducción

En los últimos años, cada vez más industrias centradas en la fabricación y comercialización de encimeras de cocina o baño tienen en cuenta los beneficios que se pueden ocasionar al medio ambiente si se desarrolla el proceso de producción de dichas encimeras basándose en el reciclaje de residuos, para así reducir el impacto ambiental. Es por ello que, en algunas empresas, (como por ejemplo Silestone Cosentino, la cual se ha tenido como referencia en este proyecto) se han adaptado los procesos de fabricación para utilizar áridos reciclados en la fabricación de sus productos.

Los productos elaborados con vidrio reciclado, los llamados “ecomateriales”, se conforman por un 75% de vidrio procedente de residuos aptos para el reciclaje, siendo el 25% restante resina y piedra natural u otro árido. Se opta por reducir lo máximo posible la proporción de la resina, ya que además de ser un producto de precio más elevado que los áridos o el vidrio reciclado, si se usa en una mayor proporción empobrece el acabado final. Es por ello que se requiere buscar el equilibrio entre las proporciones de materias primas, para que no se comprometan las propiedades mecánicas del producto final ni su acabado.



*Figura I. Acabados para encimeras elaboradas por Silestone Cosentino a partir de residuos.*

[5]

Es sabido que la gran mayoría de habitantes en nuestro país posee al menos un televisor en su hogar. Al promover el reciclaje, mediante campañas publicitarias y otros medios de información, y con el cambio que se ha sufrido estos últimos años de sustituir los televisores y monitores de tubos de rayos catódicos a pantallas LED o LCD, no es de extrañar que en los puntos limpios haya depositados una gran cantidad de televisores y monitores de tubos de rayos catódicos, y qué menos que aprovecharlos para elaborar nuevos productos útiles para la sociedad.

Se estima que alrededor del mundo hay aproximadamente 1.900 millones de televisiones de tubos de rayos catódicos que aún funcionan, pero están destinados al reciclaje [7]. De igual forma, la demanda del vidrio proveniente de los mismos es más baja que nunca. También se requiere un método de limpieza específico para eliminar el plomo de los monitores considerando un impacto mínimo para el medio ambiente, por ello es necesario considerar este tipo de vidrio para algún uso concreto, ya que actualmente hay un gran excedente de material.



*Figura II. Depósito de televisores y monitores de CRT en Zhuzhou (China) [6]*

La alternativa para la fabricación de piedra artificial con vidrio reciclado en lugar de áridos es cada vez más recurrente, generalmente se utiliza para otros usos que requieran una materia prima en mejor estado.

Tras considerarse no apto para cualquier otro tipo de reutilización, al vidrio puede realizársele un procesado determinado y fabricar nuevos materiales óptimos para volver a ser comercializados.

Se han hecho numerosos estudios en los últimos años sobre este proceso, por ejemplo, la fabricación de mortero de albañilería sustituyendo los áridos por arena de vidrio plano reciclado [2], la reutilización de vidrio reciclado y residuos cerámicos en la obtención de gres porcelánico [3]... entre otros procesos de sustitución de los áridos. Todos ellos han concluido que es viable este tipo de práctica, ya que disminuye en gran medida los costes de producción y de igual forma contribuye a reducir residuos depositados en el medio ambiente.

Generalmente, las empresas que distribuyen productos con vidrio reciclado en su composición también incluyen áridos de origen natural, como son la caliza, arena, gravas... Dado el buen resultado de la sustitución de áridos completamente por vidrio reciclado en los estudios anteriormente mencionados, nos basaremos en la sustitución completa de los áridos para la fabricación de las muestras, y analizaremos los resultados.

### 3. Antecedentes

Para el desarrollo del proyecto, principalmente nos basamos en los resultados obtenidos en el proyecto “*Fabricación de piedra artificial a partir de residuos*” [1], realizado en la Universidad de La Laguna en el año 2015, en el cual se concluye que los áridos naturales son sustituibles por vidrio procedente de botellas y envases.

Se toman como punto de partida para la elaboración de las muestras aquellas cantidades de materias primas y procesos que han producido resultados óptimos en estudios anteriores del mismo campo, como son las proporciones de grano de vidrio y el tipo de resina (epóxica). De igual forma, se intentará reducir un poco la proporción presente en cada muestra de dicha resina, y se comprobará que no influya de forma excesivamente negativa en las propiedades mecánicas.

Generalmente, en industrias como Silestone Cosentino y BretonStone, se elabora la piedra aplicando métodos de vacío, compactación y vibración, mediante los cuales se observa que el producto resultante presenta unas características mecánicas mejores que el producto que no se somete a dichos métodos. En nuestro caso a menor escala se desarrollará la fabricación de probetas aplicando aquellos métodos que están a nuestro alcance: compactación y vacío.

#### 3.1. Proceso de elaboración de grandes industrias (Silestone Cosentino)

Según la Ficha de datos de seguridad de productos de Silestone, “El material está compuesto por cargas inorgánicas minerales (85-95%), como, por ejemplo, y no limitando a ellos, arenas de sílice, cuarzos, cristobalita, vidrios y otros, poliéster (5-15%), pigmentos y aditivos”

Los procesos que requiere la fabricación de la piedra artificial en grandes industrias como Silestone Cosentino, viene diferenciado por las siguientes etapas [8]:

- Recepción de las materias primas: Áridos, resinas y aditivos llegan al polígono industrial.
- Control de calidad: El equipo de laboratorio se encarga de realizar el primer control de calidad, la materia prima debe cumplir con los estándares de calidad en cuanto a resistencia mecánica, pureza y granulometría.

- Almacenamiento: Los materiales áridos son almacenados en silos, a través de un sistema hermético y libre de impurezas. La resina es almacenada en depósitos especiales de acero inoxidable.
- Mezcla: Mediante un sistema informatizado se selecciona qué producto se desea elaborar. Los materiales son transportados a las mezcladoras, donde se homogenizan formando la masa.
- Prensado: Mediante un sistema de cintas se transporta la masa hacia la prensa, pasando por el distribuidor, que le dará a la masa la forma de tabla.
- Aspiración de vacío y vibración: Se consigue que todo el aire del interior de la masa se extraiga, y se logra la compactación deseada.
- Horneado: Tras esto, la masa se deja en la estufa durante 30 minutos a 100° C, y posteriormente se enfriará naturalmente durante 24 horas.
- Línea de pulido: Para alcanzar los estándares deseados, se utiliza un proceso de pulido mediante un sistema de discos y fresas que elimina los excesos de material generados en el proceso de prensado.
- Primer control de calidad final: Se comprueba finalmente que la tabla tiene las propiedades deseadas.
- Almacenamiento: Se deposita la tabla en el almacén de producto terminado para su venta.
- Segundo control de calidad final: Una vez marcada la superficie útil, la tabla es almacenada en una base de datos e introducida en un almacén.
- Embalaje del producto terminado: Para finalizar, se asegura que la tabla queda correctamente embalada y disponible para el transporte.

Como vemos, hay procesos de fabricación que no están a nuestro alcance debido a tratarse de un proyecto a nivel de laboratorio, pero podemos adaptar una cadena a menor escala y con procesados dentro de nuestro alcance, como son el uso de vacío y compactación a la hora de realizar las muestras.

#### 4. Materias primas

##### 4.1. Vidrio técnico

El vidrio es un material obtenido a través de un proceso de horneado a 1500 °C, y se conforma a partir de arena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y caliza ( $\text{CaCO}_3$ ).

Como se ha demostrado en estudios previamente mencionados [2], el vidrio es un buen sustituto de los áridos en el proceso de fabricación de piedra artificial.

Para la elaboración de las muestras de piedra diferenciaremos dos tipos de vidrio: CRT-F (Cathodic Ray Tube Cono) y CRT-P (Cathodic Ray Tube Pantalla). Los separamos ya que, por su diferente composición, podrían presentar variaciones en cuanto a las propiedades finales las probetas elaboradas con vidrio procedente del cono (CRT-F) o de la pantalla (CRT-P).



*Figura III. A la izquierda: CRT-P, a la derecha: CRT-F*

De todas formas, al utilizar vidrio técnico en lugar de vidrio procedente de envases para el presente proyecto, debemos observar si hay variación respecto a los estudios previos llevados a cabo con este otro tipo de vidrio, comparando los resultados de ambos a los ensayos realizados.

#### 4.1.1 Propiedades del vidrio técnico

Previo a realizar las muestras, se realizó un ensayo sobre el polvo de vidrio en el Servicio Integrado de Difracción de Rayos X, perteneciente al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) de la Universidad de La Laguna.

El experimento de difracción de rayos X en polvo consiste en bombardear la muestra (reducida a polvo) con radiación de alta energía (RX), detectándose la intensidad de la emisión estimulada por el bombardeo en función de la posición del detector, medida como ángulo de desplazamiento ( $\theta$ ) alrededor de la muestra.

La simetría presente en los materiales cristalinos hace que éstos puedan considerarse, a nivel microscópico, como una red de átomos o moléculas, capaz de difractar un haz de rayos X, obteniéndose un patrón de difracción, cuyos picos dependen de la posición de los átomos y de las distancias paramétricas de la red cristalina, y que según la ley de Bragg contiene toda la información necesaria para la determinación estructural.

Cuando el material no presenta ordenación tridimensional a larga distancia, no se produce el fenómeno de difracción y el espectro de emisión presenta una banda continua sin picos característicos, como es nuestro caso.

Se realizaron los experimentos de difracción de rayos X en polvo sobre las muestras separadas por la procedencia del vidrio, y tamizado hasta polvillo fino ( $\phi < 63\mu\text{m}$ ) por requerimiento del sistema. En todos los casos, el espectro de difracción obtenido presenta una banda continua sin picos adicionales propia de los materiales amorfos, pudiendo deducirse de estos resultados la ausencia de compuestos cristalinos en el material muestreado, tal y como se aprecia en los espectros de difracción de cada una de las muestras, que aparecen en la figura IV, que se adjunta a continuación:

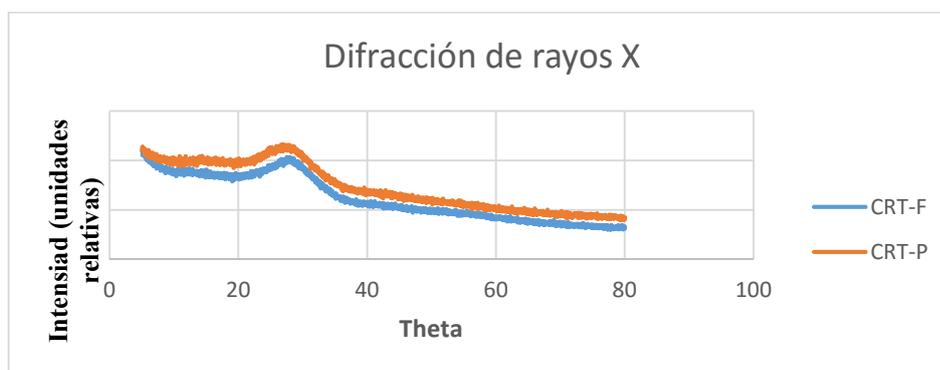


Figura IV. Gráfica comparativa de difracción de rayos X en ambos tipos de vidrio

En lo que respecta a las propiedades visuales, como se puede observar, el vidrio utilizado para el proceso de elaboración de las probetas con CRT-P presenta un cierto oscurecimiento, esto se realiza a través de diferentes procesos como pueden ser: a partir de nano partículas de plata, adición de iones colorantes, entre otros. Se ha comprobado en estudios previos que los colorantes no afectan de forma significativa a los resultados finales, por lo tanto, no se tendrá en cuenta para el análisis a los ensayos.

En cuanto al CRT-F, antes de ser desmontado de los monitores, se encuentra recubierto con una fina capa de elementos fluorescentes, llamados fósforos, los cuales emiten luz por excitación, es decir, cuando los electrones los golpean. En la actualidad, a la hora de ser depositados para su reciclaje, es un requisito indispensable retirar dichos fósforos, pero a pesar de ello pueden quedar trazas. Es por esto que se observará si este hecho afecta a las propiedades finales de las probetas.

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DEL VIDRIO</b>	
Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	2500
Dureza [HK]	470
Resistencia a la compresión [MPa]	800 - 1000
Módulo de elasticidad [MPa]	70000
Resistencia a flexión [MPa]	45

*Tabla I. Propiedades mecánicas del vidrio [9]*

#### 4.1.2 Procesamiento del residuo de vidrio

En nuestro caso, deberemos triturar el vidrio hasta conseguir polvo de vidrio de la granulometría que deseemos para elaborar las probetas. Para ello, hemos elaborado el siguiente proceso:



*Figura V. Cadena de procesado de vidrio*

A continuación, explicamos el proceso detalladamente:

- Trituradora de mandíbulas: Se depositan los grandes trozos de vidrio en una trituradora de mandíbulas, el resultado será un vidrio de menor tamaño, pero no lo suficiente como para poder clasificarlo como polvo de vidrio y realizar las muestras de piedra artificial con él.



*Figura VI. Trituradora de mandíbulas*

- Trituradora de rodillos: Se deposita el vidrio resultante del anterior proceso en una nueva trituradora. Una vez terminado este proceso se repite hasta que se haya conseguido una granulometría visiblemente uniforme.



*Figura VII. Trituradora de rodillos*



*Figura VIII. Vidrio a la salida de la trituradora de rodillos*

- Tamizado: Tras el triturado, se utilizan tamices de diversos tamaños de rejilla para separar el polvo de vidrio. Se colocan uno encima de otro y se agitan mediante procedimiento manual para realizar la separación. Los tamices utilizados separan según los siguientes diámetros de grano: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm, 0,063 mm, <0,063 mm.

Durante este tamizado se desechó la fracción por encima de 2 mm, ya que la consideramos demasiado grande para el posterior proceso de elaboración.

Antes de realizar este proceso se tuvo en consideración qué cantidad de gramos era necesaria para elaborar las 4 primeras series de probetas, teniendo en cuenta el diámetro del grano. Por ello, se elaboró una lista y se aseguró cumplir con las cantidades.



*Figura IX. Tamices utilizados para el proceso de separación del polvo de vidrio*

- Almacenamiento: Tras haber separado el polvo según su granulometría, se procedió al almacenamiento en envases para posteriormente poder elaborar las muestras, diferenciando su clasificación entre CRT-F o CRT-P.



*Figura X. Almacenamiento del polvo de vidrio según su granulometría y procedencia*

#### **4.2. Aglomerante (Super Sap 100/1000, EntropyResins)**

Se ha tenido presente la elección de dos tipos de aglomerante: resina epóxica o resina poliéster. Para la elección del aglomerante se han tenido en cuenta los resultados del proyecto ya mencionado [1], el cual dicta que el tiempo de trabajo y el acabado que ofrece la resina epóxica frente a la resina poliéster, hizo que se fijase la resina epóxica como la más favorable para la fabricación de piedra artificial. De igual forma, los resultados de los ensayos a flexión en dicho proyecto fueron más óptimos en probetas elaboradas con resina epóxica.



*Figura XI. Resina epóxica y catalizador*

### **4.2.1. Resina epóxica**

La resina epoxi o epóxica es un polímero termoestable, de naturaleza líquida y viscosa que se presenta inicialmente sin polimerizar, dándose este proceso durante la fabricación de la pieza.

Las resinas epóxicas presentan baja concentración y buena adhesión a la mayoría de las fibras. Son bastante resistentes a disolventes, ácidos y álcalis.

Esta resina se endurece al mezclarse con un agente de curado, llamado catalizador o endurecedor. Una vez en contacto con el catalizador y con el agente a unir, el periodo de curación consta unas 24-48 h. Las proporciones resina-catalizador deberán ser fijadas en una proporción de 100:50, según las indicaciones del fabricante [18].

#### **4.2.1.1. Propiedades de la resina epóxica**

Cabe destacar las siguientes propiedades principales:

- Humectación y adherencia óptimas.
- Buen aislamiento eléctrico.
- Buena resistencia mecánica.
- Resistente a la humedad.
- Resistente al ataque de fluidos corrosivos.
- Resistente a temperaturas elevadas.
- Excelente resistencia química.
- Poca contracción tras el proceso de curado.
- Excelentes propiedades adhesivas.

### **4.2.2. Catalizador**

El catalizador es un complemento a la resina, sin él no se produciría el endurecimiento de la misma y la unión del material.

Para resinas como es la epóxica, generalmente se añade una parte de catalizador cada dos partes de resina. Se intenta disminuir lo máximo posible la cantidad tanto de resina como catalizador en el proyecto, sin comprometer la calidad final de las probetas realizadas.

### 4.3. Cera (TR104 Carnauba, ResinEco)

La cera desmoldante es un lubricante no tóxico, resistente a la corrosión, inocuo e hidrofóbico.



*Figura XII. Cera desmoldante*

Se ha utilizado cera desmoldante para facilitar el proceso de desmolde una vez curadas las piezas, aplicando la misma a las partes donde mayor cúmulo de fuerzas hay durante el proceso de curado.

### 4.4. Alcohol polivinílico (IP3000, ResinEco)

El alcohol de polivinilo es un polímero sintético soluble en agua. Tiene excelentes propiedades como emulsionante y como adhesivo. También es resistente al aceite, grasas y disolventes. Es inodoro y no tóxico. Tiene alta resistencia y flexibilidad. Sin embargo, estas propiedades dependen de la humedad, y al utilizarla en un proceso de curado cuando la masa aún está húmeda, se verán afectadas ligeramente.



*Figura XIII. Alcohol polivinílico*

El alcohol polivinílico complementa a la cera desmoldante, aplicándose de igual forma y para facilitar el proceso de desmolde.

#### 4.5. Colorantes

Se han utilizado dos tipos de pastas pigmentadas (verde y blanco) para dar un acabado más refinado a la pieza, se hará uso de dichos colorantes para todas las variaciones posibles y se comprobará que no afectan a las propiedades finales de las muestras, como ya se ha visto anteriormente. Dicho colorante se aplica durante el proceso de amasado, de manera uniforme.



*Figura XIV. Pastas pigmentadas verde y blanca*

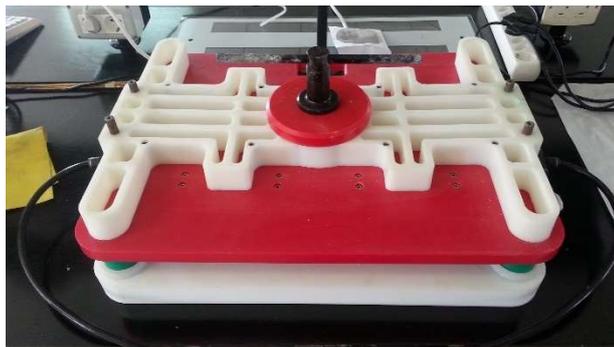
### 5. Moldes

Para la elaboración de las probetas se utilizarán dos tipos de moldes, uno que ejerce compresión y vacío (Molde Vacío, procedente de un proyecto realizado con financiación de la Fundación CajaCanarias) y otro sólo compresión (Molde Polietileno, procedente del Trabajo de Fin de Grado de María de León González [1]). Estos moldes son el resultado de la iniciativa de José Antonio Valido.

Se realizarán un total de seis series de probetas variando proporciones de grano de vidrio y otras condiciones, y se analizarán las diferencias entre los resultados obtenidos con ambos moldes.

#### 5.1. Molde Vacío (MV)

Este ha sido el molde que se ha utilizado para la elaboración de las cuatro primeras series de probetas, a él se conecta una bomba de vacío por unos tubos que se encuentran acoplados a los laterales del molde, los cuales van a cada una de las cavidades en las que se depositará la masa para el curado.



*Figura XV. Molde Vacío*

Consta de las siguientes propiedades:

- Seis cavidades para las probetas con rejillas extraíbles en la parte inferior, así como orificios en los extremos del molde en los que se encuentran introducidos los tubos para poder producir la aspiración por vacío. Cada cavidad del molde consta de unas dimensiones de 150x40x10 mm, y es desmontable.
- Tapa con machos en la parte inferior para ejercer presión sobre cada muestra. En la parte superior tiene un sistema de aplicación de presiones para distribuir la presión de la manera más uniforme posible. También cuenta con un agujero central para pasar por él una rosca situada en la parte inferior del molde, y poder ejercer la mayor presión posible mediante un sistema de enroscado.
- Sistema digital de detección de masa para identificar los kilogramos que se aplican uniformemente a la superficie de las muestras, con un display que muestra el valor de masa.
- Sensores para la detección de masa en los cuatro extremos de la parte inferior del molde.
- Cuatro guías en los extremos izquierdo y derecho del molde para asegurar la distribución de presión de la forma más uniforme posible.

### 5.1.1. Bomba de vacío

Complementando este molde, siempre que se ha hecho una serie de muestras con el mismo se ha puesto en funcionamiento una bomba de vacío (tst-24N) durante el proceso de curado. [11]



*Figura XVI. Bomba de vacío*

Sus propiedades son las siguientes:

- Desalojo de aire: 128 l/min a 50 Hz, 142 l/min a 60 Hz
- Micrones: 15
- Voltaje: 220 V~/50-60 Hz
- Potencia: ½ HP / 0,373 kW
- Capacidad de aceite: 0,325 ml

### 5.2. Molde Polietileno (MP)

Se ha utilizado este molde para la elaboración de las dos últimas series de probetas, consta de dos placas de polietileno de 36 cm de largo, 20 cm de ancho y 10,5 cm de espesor, así como de una tercera placa para depositar y curar la masa, con las cavidades correspondientes para 6 probetas (figura XVII), cada cavidad del molde consta de unas dimensiones de 150x40x10 mm, por lo tanto, se producirán unas probetas con estas dimensiones aproximadamente. También cuenta con seis placas más finas de polietileno de unas dimensiones de 148x40x8,80 mm que encajan en las cavidades donde se depositará la masa. Las tres placas se pueden unir mediante un sistema de 9 tornillos de cabeza avellanada.

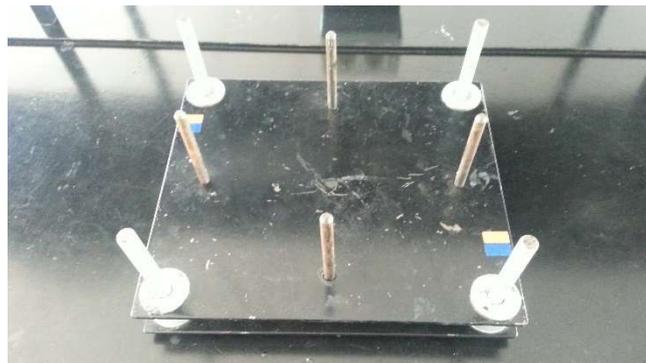


*Figura XVII. Molde Polietileno (MP)*

De igual forma, implementaremos alguna variación al uso normal de este molde, utilizando las seis placas de menor tamaño para asegurar una mayor tensión durante el curado, así como un sistema de presiones alternativo (ap. 5.2.1).

#### **5.2.1. Sistema de presiones alternativo**

Complementando al Molde de Polietileno (MP), se ha hecho uso de una estructura para ejercer una mayor presión, perteneciente al Laboratorio de Prácticas del Departamento de Materiales. Cuenta con dos placas metálicas y ocho orificios situados alrededor de la placa metálica superior, siendo cuatro de ellos (situados en los vértices) para introducir las roscas situadas en la placa inferior y ejercer presión con empuñaduras de mariposa, y los otros cuatro para introducir guías metálicas y distribuir de manera más uniforme la presión.



*Figura XVIII. Sistema de presiones alternativo*



*Figura XIX. Rosca y empuñadura de mariposa*

Se han tenido que eliminar dos de las guías metálicas para poder introducir el molde dentro de este sistema, esto podrá dar lugar a que la presión no se reparta de manera uniforme a través de todo el molde, pero de todas formas se estudiará si es viable y es una alternativa posible al Molde Vacío.

## **6. Elaboración de las probetas**

Se ha realizado un total de seis series de seis probetas cada una. En las cuatro primeras series, que llamaremos Probetas Molde Vacío (PMV) se ha utilizado el molde de vacío, alternando el uso de CRT-P y CRT-F.

Posteriormente, analizando los resultados obtenidos en las cuatro series anteriores, se intentará mejorar el proceso y se elaborarán dos nuevas series, las Probetas Molde Polietileno (PMP)

Las probetas de cada serie seguirán la siguiente nomenclatura (X-Y o X.Y):

PMV						
Serie (X)	N° de probeta (Y)					
1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6
PMP						
Serie (X)	N° de probeta (Y)					
5	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6

Tabla II. Nomenclatura adoptada para las probetas

### 6.1. Fabricación y curado de la masa

El procesado del polvo de vidrio para la fabricación de la masa sigue el mismo procedimiento, tanto en el Molde de Vacío como en el Molde de Polietileno.

#### 1. Pesado:

- Primeramente, se pesan las cantidades de polvo de vidrio con una balanza de precisión 0,001 g [19], que son necesarias para cada serie, asegurando que es la cantidad previamente determinada para la elaboración de la misma, con un error de  $\pm 5$  g.
- Se deposita dicho material en un cubo.

#### 2. Preparación del aglomerante:

- Se calienta la resina epóxica al Baño María durante 3 minutos. Para posteriormente, depositarla en un nuevo recipiente y pesar la cantidad de resina necesaria.
- Se pesa el catalizador necesario en otro recipiente pequeño.
- Se van mezclando en un nuevo recipiente de mayor tamaño la resina y el catalizador, con movimientos circulares de una varilla de aluminio.

### 3. Materias primas listas:

- Se deposita dicha mezcla en el cubo con polvo de vidrio.
- Simultáneamente se le añade colorante para mejorar el resultado final (las 3 primeras series será colorante blanco, de la 4ª en adelante será colorante verde).

### 4. Mezclado:

- Se prepara el instrumento mezclador (taladro con un mezclador fijado en su eje de giro) y se tapa el cubo. Se pone en funcionamiento y se hacen giros circulares durante aproximadamente 3 minutos, hasta asegurar que la mezcla es lo suficientemente homogénea.

### 5. Depositado:

- Se van rellenando las cavidades del molde con la masa, de forma manual, haciendo la mayor presión posible y asegurando que no queden orificios visibles.

### 6. Curado:

- Se dejan las muestras en el molde durante un periodo de tiempo, normalmente 24 horas. Este proceso variará dependiendo de la serie que sea elaborada.

## 6.2. Probetas Molde Vacío (PMV)

Para la realización de las cuatro primeras series de probetas se ha utilizado el Molde Vacío (MV).

Basándonos en los resultados del proyecto “*Fabricación de piedra artificial a partir de residuos*” [1], comenzamos la elaboración con las proporciones de vidrio en la que mejores resultados estructurales se obtuvieron, posteriormente iremos variando dichas proporciones para ver la importancia granulométrica en la elaboración de las probetas.

A continuación, se muestra una tabla con la granulometría de las 4 primeras series de probetas:

SERIE	CANTIDAD DE MATERIAL POR PROBETA								
	Vidrio							Aglomerante	
	2 mm [g]	1 mm [g]	500 $\mu$ m [g]	250 $\mu$ m [g]	125 $\mu$ m [g]	63 $\mu$ m [g]	<63 $\mu$ m [g]	Resina e.[g]	Catalizador [g]
<b>1 (CRT-P)</b>	-	-	60,00	-	30,00	-	10,00	14,00	7,00
<b>2 (CRT-P)</b>	-	-	60,00	-	25,00	-	15,00	16,00	8,00
<b>3 (CRT-F)</b>	-	-	60,00	-	30,00	-	10,00	14,00	7,00
<b>4 (CRT-P)</b>	-	-	-	60,00	-	30,00	10,00	14,00	7,00

*Tabla III. Proporciones de las 4 primeras series*

Las proporciones expuestas en la tabla se han multiplicado por siete a la hora de elaborar la masa, para poder fabricar las seis probetas que componen el molde de vacío sin riesgo de que haya escasez de material.

Cada muestra, exceptuando la serie 2, se encontrará conformada por un 82,64% de vidrio y un 17,36% de aglomerante (porcentaje en masa), si la mezcla se realiza de forma adecuada.

Las muestras de la serie 2 se encontrarán formadas por un 80,64% de vidrio y un 19,36% de aglomerante (porcentaje en masa).

Una vez realizadas estas cuatro series, se analizarán las propiedades mecánicas de las probetas resultantes, y se decidirá si se sigue optando por la utilización de este molde o se realizarán variaciones en el proceso.

### **6.2.1. Preparación del molde y compactación de la masa**

Primeramente, se debe preparar el molde de vacío para introducir la masa, para ello se han impregnado las seis cavidades del molde y los seis machos de la parte inferior de la tapa con alcohol polivinílico. De igual forma se ha puesto cera alrededor de las cavidades de la parte inferior del molde que entran en contacto con la tapa, para evitar que se pegue.

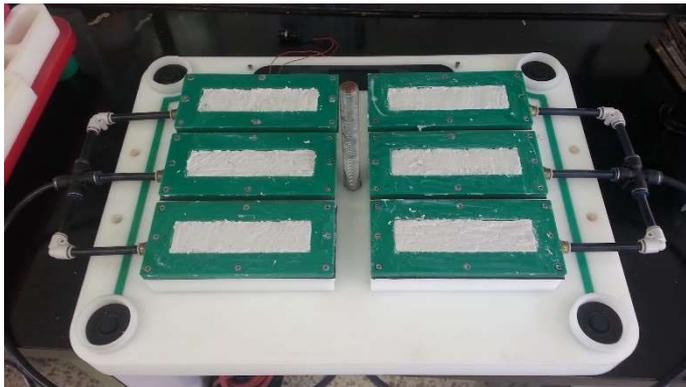
Posteriormente, se ha procedido a la elaboración de la masa, siguiendo el proceso anteriormente indicado (ap. 6.1); Se ha depositado la mezcla intentando, en la medida de lo posible, reducir al máximo las áreas carentes de material dentro del molde para así evitar la

disparidad entre las probetas resultantes, se ha realizado manualmente la máxima presión posible para asegurar la calidad del proceso.

Cada una de estas cuatro series se elaboró de la misma forma, aunque en alguna serie, como la 2, se observó un claro decremento en cuanto a la calidad. Lo cual se desarrolla en el análisis de fallos de este molde (ap. 6.2.4).

Para evitar, en la medida de lo posible, que la masa durante el curado se filtre a través de la rejilla de la parte inferior del molde debido al vacío ejercido por la bomba, se ha colocado una fina tela en la parte inferior de cada una de las cavidades. De igual forma, se ha colocado otra porción de tela sobre cada probeta una se ha dispuesto la masa dentro de las 6 cavidades del molde, para facilitar el desmolde en cuanto se retire la tapa.

Una vez depositada y compactada la masa (figura XX), ésta se encontrará lista para comenzar el proceso de curado.



*Figura XX. Serie 1 preparada para el curado*

### **6.2.2. Proceso de curado**

Tras colocar la tela encima de las probetas, se coloca la tapa con sus guías para evitar que se mueva, de igual forma se hace la mayor presión posible girando el torque situado en el centro del molde en una rosca, y el peso situado en la parte superior (figura XXI). Se conecta la bomba de vacío durante un tiempo aproximado de 24 horas, a temperatura ambiente.



*Figura XXI. Molde Vacío durante el curado de la serie 2.*

### **6.2.3. Desmolde y resultados**

Las probetas se han desmoldado sin excesiva dificultad, exceptuando la serie 4, en la que se filtró gran cantidad de masa a través de las rejillas durante el proceso de curado (ap. 6.2.4). En la figura XXII se muestran todas las probetas con un color uniforme, exceptuando las de la serie 2, las cuales presentan mezclas de tonos debido a la mala mezcla realizada (ap. 6.2.4).

La probeta 2-6 fue la única que se quebró durante este proceso.



*Figura XXII. De izquierda a derecha: Acabados de las series 1, 2, 3 y 4, tras haber sido sometidas a proceso de lijado (ap. 7.3.1)*



*Figura XXIII. Series de la 1 a la 4*

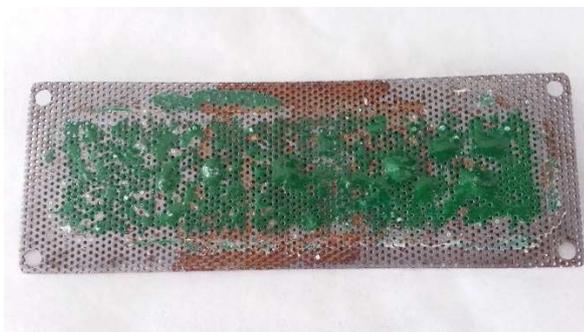
#### 6.2.4. Análisis de fallos

A continuación, se detallan aquellos hechos relevantes que tuvieron lugar durante la elaboración de las 4 primeras series y aquellos que afectaron negativamente al acabado final de las probetas:

- *Serie 1 (CRT-P)*: El display medidor de masa no indicaba que se estuviera ejerciendo ningún tipo de aplicación de carga sobre las probetas. Por ello, se decidió colocar en los extremos de la tapa que entra en contacto con la parte inferior unos círculos de silicona para asegurar el contacto entre los dos componentes del molde y así saber cuánta carga se está aplicando sobre las muestras. Sin saberlo con demasiada certeza, se estima que la carga ejercida es de 10,00 kg, ya que el display dejó de mostrar la cuantificación mientras se estaba apretando la tapa, y tras volverlo a encender, el contador de masa se reinicializó y mostraba 0,00 kg. Fue muy poco lo que se pudo aumentar la masa tras este hecho, por lo tanto, no se tendrá en cuenta para este caso. Tras esto, se conectó la bomba de vacío (con una presión de 150 mbar) al tubo que sobresale del molde para poder ejercer vacío durante el proceso de curado de las probetas.
- *Serie 2 (CRT-P)*: Al depositar la mezcla en el molde para su fabricación, se pudo apreciar que la masa no se encontraba tan unida como en la anterior serie, habiendo gran cantidad de granos de vidrio sueltos, lo cual resultó en unas probetas de mucha menor calidad que las de la primera serie. Esto se debe a que no se realizó una mezcla efectiva de las materias primas, a pesar de disponer de mayor cantidad de aglomerante.

Al conectar la bomba de vacío se apreció que ésta ejercía menos vacío que en la ocasión anterior (Presión de 600 mbar), por lo que se dedujo que podría haber una fuga en algún punto del circuito que conecta la bomba con el molde, o que sería necesario cambiarle el aceite. Se aseguraría el correcto funcionamiento de la bomba para la siguiente serie.

- *Serie 3 (CRT-F)*: No se detectaron fallos destacables, aunque se filtró algo de masa a través de las rejillas.
- *Serie 4 (CRT-P)*: En este caso se filtró mucha de la masa a través de las rejillas metálicas del molde, a pesar de haber colocado la tela para evitar la filtración (figura XXIV). Debido a esto se dificulta su uso para posteriores ocasiones. También empezó a apreciarse la aparición de óxido en las láminas. Se tendrá esto en cuenta para utilizar otro tipo de tela de mayor grosor que evite en la medida de lo posible esta filtración, asegurando siempre que la bomba de vacío funcione de forma efectiva.



*Figura XXIV. Filtración de masa en láminas de metal*

### **6.3. Probetas Molde Polietileno (PMP)**

Tras haber realizado las cuatro primeras series de probetas con el Molde Vacío (MV), se decidió optar por la utilización de otro molde más simple (Molde Polietileno), para comprobar si es óptima la aplicación de vacío al proceso de elaboración.

Para la elaboración de las dos últimas series se han tenido en cuenta los resultados del ensayo a flexión (ap. 9.3.1) de las 4 primeras series, adaptando las proporciones de grano a aquella serie que presentó mejor resistencia a flexión.

También se planteó un nuevo método para el secado de la masa, haciéndolas permanecer en la estufa durante cierto periodo de tiempo (ap. 6.3.2).

SERIE	CANTIDAD DE MATERIAL POR PROBETA								
	Vidrio							Aglomerante	
	2 mm [g]	1 mm [g]	500 µm [g]	250 µm [g]	125 µm [g]	63 µm [g]	<63 µm [g]	Resina e.[g]	Catalizador [g]
<b>5 (CRT-F)</b>	-	-	60,00	-	30,00	-	10,00	14,00	7,00
<b>6 (CRT-F)</b>	-	-	60,00	-	30,00	-	10,00	14,00	7,00

*Tabla IV. Proporciones de las series 5 y 6*

Las proporciones expuestas en la tabla se han multiplicado por siete a la hora de elaborar la masa, para poder fabricar las seis probetas que componen el molde de vacío sin riesgo de que haya escasez de material.

Cada muestra, se encontrará conformada por un 82,64% de vidrio y un 17,36% de aglomerante (porcentaje en masa), si la mezcla se realiza de forma adecuada.

Aunque las proporciones tomadas en este caso son las mismas, el proceso de aplicación de presiones variará durante el curado de las muestras (ap. 6.3.1).

### 6.3.1. Preparación del molde y compactación de la masa

Para la preparación del molde se hizo de forma similar al Molde Vacío:

- Primeramente, se impregnó de alcohol polivinílico las 6 cavidades del molde, así como las placas de polietileno.
- Luego se le aplicó cera sólo a las cavidades del molde.

En la compactación de la masa, se puso una capa de tela sobre las seis probetas, y posteriormente las seis láminas de polietileno encima de cada una de las cavidades (figura XXV).

Posteriormente, se optó por realizar diferentes maneras de compactación para la serie 5 y la serie 6, aunque las dos fueron con el sistema de presiones alternativo (ap. 5.2.1):

- Para la serie 5: Se pusieron las tres placas de polietileno, con las respectivas láminas nombradas anteriormente encima de cada probeta.

- Para la serie 6: Se omitió la placa superior de polietileno para intentar hacer más efectiva la aplicación de presiones. También se procuró aplicar una mayor presión manual a la hora de introducir la masa en el molde.



*Figura XXV. Molde Polietileno preparado para introducir en la estufa (a falta de la placa de hierro superior)*

En “desmolde y resultados” (ap. 6.3.3) observaremos si con la serie 6 se ha mejorado el proceso de compactación.

### **6.3.2. Proceso de curado**

Como se ha mencionado anteriormente, los procesos de curado para estas dos series difieren de las cuatro primeras, y a la vez también difieren entre sí para cada serie. En esta ocasión se ha preparado una estufa, hasta que ha alcanzado la temperatura de 90 °C. Una vez alcanzada dicha temperatura, el Molde Polietileno, conjunto con el sistema de presiones alternativo, se han introducido en la estufa.

- Para la serie 5 se dejó el molde en la estufa durante 24 horas, y al extraerlo se dejó que se adaptase a la temperatura ambiente antes de desmoldar.
- Para la serie 6 las piezas se dejaron en la estufa durante 3 días (con un tiempo de funcionamiento de la estufa de 5 horas diarias), también se dejó que alcanzase la temperatura ambiente antes de realizar el desmolde.



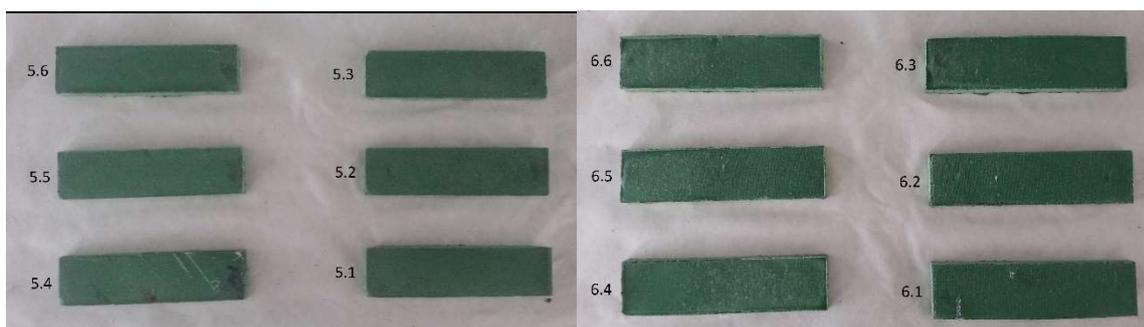
*Figura XXVI. Serie 5 tras realizarse el proceso de curado*

### **6.3.3. Desmolde y resultados**

En el caso de estas dos series ha resultado algo más complicado el desmolde, ya que al ser una sola placa de polietileno en la que estaban todas las muestras y no pequeñas placas individuales, se ha tenido que ejercer presión de manera diferente, por dificultades para maniobrar con dicha placa.

Ha sido necesaria la ayuda de un martillo para facilitar el desmolde de algunas de las piezas manera efectiva. No se ha producido la fractura de ninguna pieza durante el proceso. Las probetas presentan un color verde uniforme (figura XXVII).

También, al desmoldar, la tela se había quedado demasiado introducida en la masa, por lo cual hubo que hacer bastante fuerza para poder sacarla, y aun así quedaron algunos restos, pero serían extraídos en el posterior proceso de lijado de las piezas.



*Figura XXVII. Series 5 y 6 tras el desmolde*

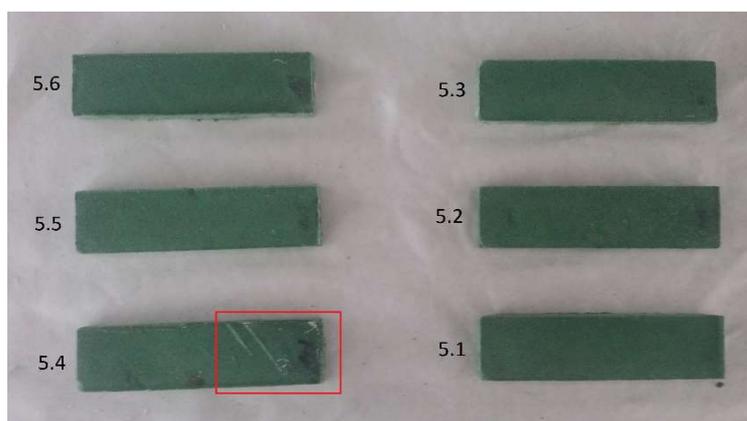
#### 6.3.4. Análisis de fallos

En este caso, se apreciaron los siguientes fallos importantes durante el proceso:

- En ambas series, el sistema de presiones alternativo ejercía presión de manera no uniforme. Esto se debe a que la presión se ejercía principalmente en los extremos de dicho sistema, y tuvieron que quitarse dos de las guías del mismo para poder introducir el molde en él.

Por ello, en algunas zonas de las probetas puede apreciarse que la masa se encuentra algo más compacta, apreciándose un pequeño desnivel en la masa dentro de la cavidad donde se encuentra la probeta. El desnivel es de aproximadamente 2 milímetros.

- En ambas series, en el proceso de desmolde, se podía apreciar que gran cantidad de la tela puesta en la parte superior se había quedado introducida dentro de la masa, debido a la alta presión que se ejerció durante el horneado (figura XXVIII). Se intentó quitar manualmente lo máximo posible, y posteriormente en el proceso de lijado se eliminará el resto.



*Figura XXVIII. Serie 5 tras el desmolde (En la probeta 5-4 se puede apreciar cómo la tela se ha introducido en la masa)*

- En ambas series se ha producido filtración de un poco de masa por la parte inferior del molde, donde se encuentra la unión de la placa del centro con la inferior. No se ha

considerado un fallo relevante, ya que no ha sido demasiada cantidad y se puede eliminar fácilmente de manera manual.

- En ambas series se pueden apreciar burbujas de aire en la parte inferior de las probetas (figura XXIX), esto podría afectar negativamente a sus propiedades estructurales. Se estudiará este hecho en el ensayo para determinar la resistencia a flexión (ap. 7.3).



*Figura XXIX. Burbujas de aire en la parte inferior de la probeta 6-3*

## 7. Ensayos

Los ensayos realizados sobre las probetas tienen como objetivo principal caracterizar las propiedades mecánicas de las mismas. Para ello se ha acudido al paquete normativo UNE-EN 14617 [22] en el que se incluyen una serie de ensayos para piedra aglomerada.

Antes de la realización de cualquiera de los ensayos, se ha realizado microscopía digital para asegurar que no se ha producido ninguna reacción no deseada durante el proceso de elaboración de las probetas.

La normativa UNE-EN 14617 [22] incluye un total de dieciséis ensayos para la caracterización total de la piedra aglomerada a partir de sus propiedades físico-mecánicas. Sin embargo, se ha optado por realizar cuatro de dichos ensayos, aquellos que podían ser realizados en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Industrial.

También se ha tomado como referencia la norma UNE-EN 14205 [21] para la determinación de la dureza Knoop para piedra natural, pero al no estar vigente dicha norma, se han tomado ciertas libertades respecto a la misma a la hora de desarrollarla.

Los ensayos que se han escogido para este proyecto son los siguientes:

- Microscopía digital

- Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (UNE-EN 14617-1 [23])
- Determinación de la resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2 [24])
- Determinación de la dureza Knoop para piedra natural (UNE-EN 14205 [21])
- Determinación de la resistencia al choque térmico (UNE-EN 14617-6 [25])
- Determinación de la resistividad eléctrica

### 7.1. Microscopía digital

La microscopía digital consiste en la utilización de un pequeño microscopio digital para observar la muestra y comprobar si se han producido reacciones o fenómenos no deseados a la hora de la solidificación de los materiales durante el proceso de elaboración.

Se ha utilizado un microscopio óptico digital Dino-Lite modelo AM-211 (figura XXX), y un software específico para tomar capturas de las imágenes tomadas.

A partir de dicho microscopio, con una ampliación x60, se puede observar con mayor detalle la estructura microscópica de la piedra.



*Figura XXX. Microscopio óptico Dino-Lite*

### 7.2. Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (UNE-EN 14617-1)

El presente ensayo se llevó a cabo tras la “Determinación de la resistencia a flexión” (ap. 7.3), sin embargo, se ha incluido antes para seguir la nomenclatura de la normativa UNE.

Analizaremos si el parámetro de absorción de agua depende del proceso de fabricación, ya inicialmente teorizamos que dicho proceso interfiere en la porosidad que presenta la probeta final, y que cuanto más porosidad presente un material, mayor absorción de agua presentará el mismo.

### **7.2.1. Acondicionamiento de las probetas**

Para este ensayo se ha seguido el acondicionamiento requerido en la descripción de la norma: las probetas se han secado en una estufa a una temperatura de 70 °C, hasta que el peso de las probetas en dos pesadas consecutivas no variase más de un 0,1% de la masa total de la muestra (esta masa es la que posteriormente nombraremos como  $M_0$ ).

Posteriormente, para realizar el ensayo, se deben dejar reposar hasta que la superficie alcance la temperatura ambiente.

Las probetas se encontraban lijadas tras someterse al proceso de acondicionamiento necesario en el ensayo a flexión, el primer ensayo realizado para todas las probetas (ap. 7.3.1).

### **7.2.2. Descripción del ensayo**

Para este ensayo se han utilizado los siguientes elementos:

- Balanza de precisión 0,001 g.
- Balanza hidrostática con precisión 0,001 g.
- Tanque de base plana, con soportes antioxidantes para depositar las probetas.
- Estructura metálica para realizar la pesada hidrostática.
- Recipiente para depositar las probetas debajo del agua.

Los instrumentos ya montados para realizar este ensayo pueden verse en la figura XXXI.

El ensayo se ha realizado con todas las probetas de todas las series, utilizando la balanza para tomar las medidas de masa fuera del agua y la balanza hidrostática para tomar las medidas de masa en el interior del agua.



*Figura XXXI. Pesa y balanza hidrostática*

Para determinar el parámetro de absorción de agua se utilizará la siguiente fórmula:

$$C = \frac{100 \times (M_t - M_0)}{M_0}$$

Donde:

C es la absorción de agua, en porcentaje (%)

$M_0$  es la masa de la muestra pesada al aire después del secado, en kg

$\rho_{H_2O}$  es la densidad real del agua a la temperatura existente durante la medición, en  $\text{kg/m}^3$

$M_t$  es la masa de la muestra empapada en agua, secada con un paño húmedo al aire, en kg

Asimismo, podemos caracterizar la piedra a partir de su densidad aparente, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$M_V = \frac{M_0 \times \rho_{H_2O}}{(M_t - M_a)}$$

Donde:

$M_V$  es la densidad aparente, en  $\text{kg/m}^3$

$M_0$  es la masa de la muestra pesada al aire después del secado, en kg

$\rho_{H_2O}$  es la densidad real del agua a la temperatura existente durante la medición, en  $\text{kg/m}^3$

$M_t$  es la masa de la muestra empapada en agua, secada con un paño húmedo al aire, en kg

$M_a$  es la masa de la muestra empapada en agua y pesada en agua, en kg

### 7.2.3. Desarrollo del ensayo

Se han sumergido las dos mitades de todas las probetas en el agua (a una temperatura de  $20 \pm 2$  °C) con soportes antioxidantes para disminuir lo máximo posible el contacto entre las probetas y el recipiente que las contiene, y asegurando que las probetas se encontraban completamente sumergidas.

Todas las probetas se han introducido en el mismo instante de tiempo, y se irán tomando las medidas de las variaciones de masa en los días sucesivos.

Se han tomado datos de los pesos (tanto fuera del agua como sumergidas) transcurrida 1 hora, 8 horas, y posteriormente en intervalos regulares de 24 horas hasta que en tres pesadas consecutivas fuera del agua la masa no tuviera una variación mayor del 0,1%.

Para las pesadas bajo el agua, se ha utilizado un instrumento sujeto a la parte inferior de la pesa, el cual se ha sumergido en un cubo con agua. (Figura XXXII).



*Figura XXXII. Instrumento para realizar la pesada bajo el agua*

Para el tiempo de espera en la absorción de agua, se ha asegurado que las muestras quedasen perfectamente sumergidas (figura XXXIII) y ninguna parte de las mismas estuviera fuera del agua, habiendo una diferencia entre la superficie del agua y las muestras más cercanas a la misma de unos 5 milímetros.



*Figura XXXIII. Serie 6 sumergida*

### **7.3. Determinación de la resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2)**

La flexión caracteriza el comportamiento de un elemento estructural de poco espesor sometido a una carga externa aplicada perpendicularmente al eje longitudinal del elemento a estudiar, estudiándose la deformación que se presenta al aplicar dicha carga.

La resistencia a flexión, es decir, la cantidad máxima de carga soportada antes de quebrarse la pieza a estudio, es una propiedad mecánica muy descriptiva de diversos tipos de materiales y de gran interés respecto al resto de propiedades. Es por ello que es el primer ensayo que realizaremos siempre tras terminar de elaborar una serie, y a partir de él se seguirán realizando los diferentes ensayos.

Antes de nada, las probetas deben acondicionarse mediante un proceso de lijado, así ya las tendremos acondicionadas para el resto de ensayos que realizaremos.

Se graficarán los resultados de este ensayo, y estudiaremos cada una de las gráficas resultantes para observar en qué valor se sitúa el módulo de ruptura (MOR) o resistencia a flexión ( $R_{tf}$ ) de nuestra piedra, asimismo compararemos los resultados entre todas las series en las que se realice dicho ensayo.

Calcularemos también el módulo a flexión (MOE), aunque no lo pide específicamente la norma, ya que puede ser un parámetro relevante, y depende de la pendiente de la curva de la gráfica del ensayo a flexión, así como de las dimensiones y la forma de la sección transversal de la probeta.

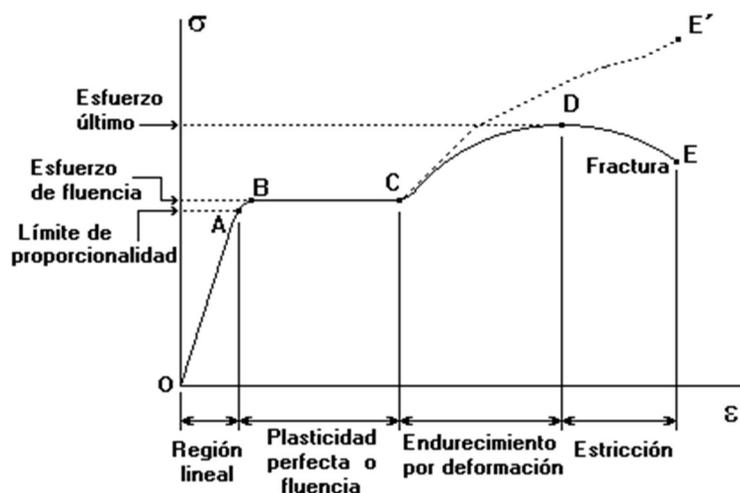


Figura XXXIV. Modelo elástico lineal [12]

### 7.3.1. Acondicionamiento de las probetas

Una vez extraídas las cuatro primeras series del molde, se lijaron hasta alcanzar la mayor uniformidad posible en sus hendiduras superficiales con una lijadora de banda eléctrica Bosch PSB 75 A, con papel de lija Dexter #80.

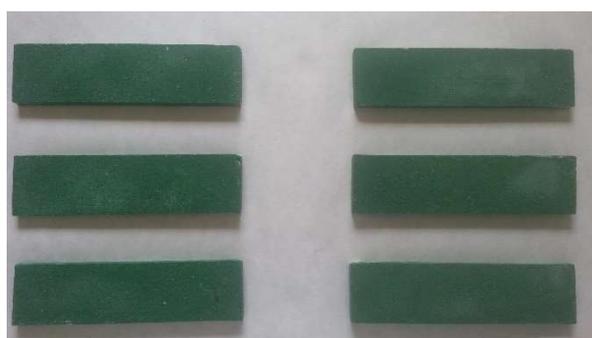


*Figura XXXV. Lijadora utilizada para el acondicionamiento*

Posteriormente se lavaron con agua para eliminar el polvo de vidrio residual, se dejaron en la estufa a una temperatura de 50 °C durante 24 horas y al sacarlas se esperó hasta que su temperatura superficial alcanzara la temperatura ambiente, el resultado final de algunas series puede apreciarse en las figuras XXXVI y XXXVII.



*Figura XXXVI. Serie 3 tras el proceso de lijado*



*Figura XXXVII. Serie 4 tras el proceso de lijado*

El acondicionamiento se realizó de igual forma para las series 5 y 6, pero se realizó tras haber completado el ensayo a flexión de las cuatro primeras series.

### 7.3.2. Descripción del ensayo

Para la realización de este ensayo se han utilizado los siguientes elementos:

- Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph, preparada previamente para realizar ensayos a flexión.
- Software específico para el tratamiento de datos.
- Dispositivo de aplicación de cargas a flexión a tres puntos.
- Pie de rey con precisión de 0,01 mm, para medir la distancia a la que se produce la fractura respecto al centro de aplicación de la fuerza.

El procedimiento se basa en situar cada probeta sobre dos cilindros de apoyo, con una distancia entre sí previamente determinada, y un tercer cilindro central sobre el que se ejercerá fuerza progresivamente hasta que la probeta a ensayar quiebre.

Los ensayos de resistencia a flexión se han realizado con todas las series y todas las probetas, exceptuando la probeta 2-6, ya que fue la única que se fracturó antes de realizar dicho ensayo. Asimismo, los datos de la probeta 1-4 no pudieron ser almacenados por causas ajenas a la realización del ensayo.

Para el ensayo se ha procedido según la normativa UNE-EN 14617-2 [24], utilizando para ello la máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph (Figura XXXIX), perteneciente al Área de Ciencia de Materiales, ubicado en el Laboratorio de Propiedades Mecánicas de la Universidad de la Laguna. También se ha hecho uso del software TRAPEZIUM2 de Shimadzu.



*Figura XXXVIII. Probeta lista para ser ensayada*



*Figura XXXIX. Máquina de ensayos mecánicos AG-IS 50 kN Shimadzu Autograph*

Para calcular el módulo de resistencia a flexión (MOR) nos basaremos en los datos obtenidos a partir del software y expresaremos dichos resultados en gráficos para así poder compararlos.

La resistencia a flexión  $R_{tf}$  de cada probeta se calcula con la siguiente expresión:

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

Donde:

$R_{tf}$  es la resistencia a flexión (MOR), en MPa

F es la carga de rotura, en N

l es la distancia entre los rodillos de apoyo, en mm

b es la anchura de la probeta adyacente al plano de rotura, en mm

h es el espesor de la probeta adyacente al plano de rotura, en mm

Asimismo, también podemos calcular el módulo a flexión (MOE), teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$E_{fl} = \frac{l^3 m}{4bh^3}$$

Donde:

$E_{fl}$  es el módulo a flexión (MOE), en MPa

$l$  es la distancia entre los rodillos de apoyo, en mm

$m$  es la pendiente de la curva a flexión

$b$  es el ancho de la muestra, en mm

$h$  es el espesor de la muestra, en mm

### 7.3.3. Desarrollo del ensayo

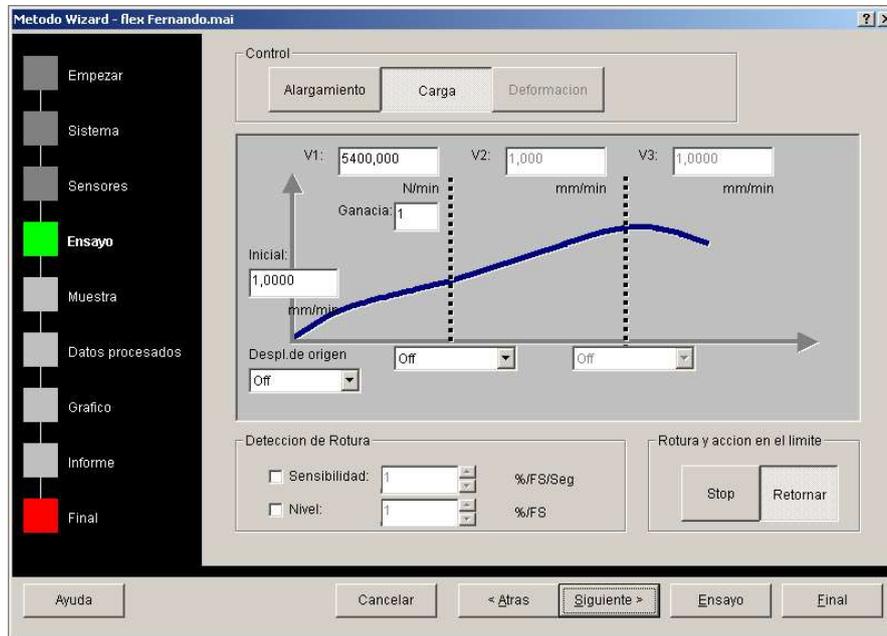
Se han ajustado los parámetros de la máquina de ensayos para tomar como valor inicial los 0 N. Y la deflexión del cilindro superior en 0 mm.

La distancia entre los rodillos de apoyo será constante para todas las probetas, y la hemos tomado como 60 mm.

Según norma, la carga debe incrementarse uniformemente a una velocidad de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s, hasta que se produzca la rotura de la probeta. Por ello, debemos calcular los N/min que debe aplicar la máquina de ensayos. Para ello, calculamos la superficie de un corte transversal de la probeta (aproximadamente, haciendo una media de todas las probetas elaboradas), y lo multiplicamos por la carga que nos exige la norma a aplicar, resultando que debemos configurar el software para que vaya progresivamente a un ritmo de 5400 N/min. Pueden verse estos ajustes aplicados al software en la figura XL.

Al no estar en contacto inicialmente el cilindro superior con la probeta, se deberá restar la cantidad de distancia que se recorre dicho cilindro desde que empieza un ciclo

del ensayo hasta que entra en contacto con la pieza a ensayar. Esto se hace para determinar la cantidad exacta de milímetros que se deforma la probeta antes de quebrarse.



*Figura XL. Control de carga configurado para el ensayo*

Primeramente, se efectúa este ensayo para las 4 primeras series de probetas, y a partir de estos resultados se procederá a la elaboración de las posteriores, teniendo en cuenta aquellas series que mejor resistencia y módulo a flexión presenten, aplicando las proporciones y los métodos que se utilizaron en estas series para intentar mejorar los resultados posteriores.



*Figura XLI. Pieza 3-2 justo tras quebrarse durante el ensayo*

#### 7.4. Determinación de la dureza Knoop (UNE-EN 14205)

La dureza es una medida de cuán resistente es la materia sólida respecto a una deformación localizada.

Para caracterizar las probetas en cuanto a este parámetro, se optó por determinar la microdureza Knoop, basándonos en la normativa UNE-EN 14205 [21] para piedra natural, a pesar de que ya no se encuentra vigente.

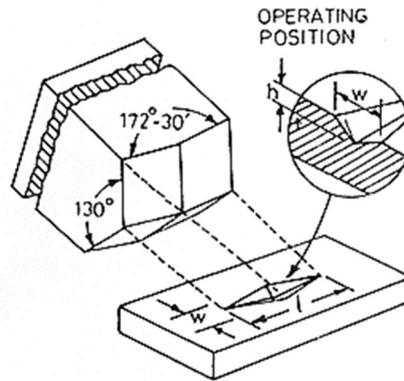
La microdureza Knoop mide la dureza en valores de escala absolutos, y se valoran con la medida de las señales grabadas mediante un indentador con una punta de diamante de forma piramidal (Figura XLII).



*Figura XLII. Identador de diamante Knoop para el ensayo en piedra*

Se ha optado por realizar este ensayo de dureza, ya que se aplica principalmente a materiales frágiles o delgados, en los cuales sólo pueden hacerse pequeñas incisiones para no producir un deterioro irrecuperable del material de ensayo.

La norma no se refiere específicamente a nuestro tipo de piedra, pues dicha norma se aplica a piedra natural y no a piedra aglomerada. De igual forma, se intentará aplicar de la forma más similar posible y se observará si puede tenerse en cuenta la utilización de esta norma para calcular este parámetro.



*Figura XLIII. Esquema de una muesca resultante tras el ensayo de dureza [14]*

#### **7.4.1. Acondicionamiento de las probetas**

Antes de la realización del ensayo se acondicionaron las piezas tal como indica la norma, para ello se pulieron las mismas por sólo una cara con una pulidora Struers LaboPol-5 con discos abrasivos (figura XLIV), poniendo en el disco giratorio primeramente un disco abrasivo de lija P#1000 (figura XLV), para refinar el lijado que ya se les dio a las probetas para los ensayos a flexión (ap. 7.3.1).



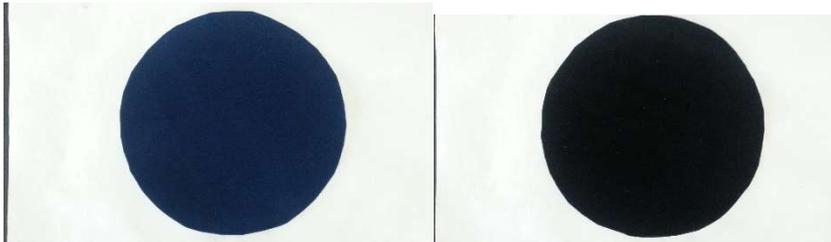
*Figura XLIV. Pulidora Struers LaboPol-5*

Para reducir la superficie de contacto en este proceso, se fracturaron las mitades ya ensayadas de cada muestra a flexión, para facilitar el posterior pulido y porque no es necesaria tanta superficie de material para hacer las indentaciones que nos planteamos realizar.

Tras ello, se comenzó con el pulido, utilizando paños de fieltro (figura XLVI) y pasta de alúmina, primero de 5  $\mu\text{m}$  y posteriormente de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro del grano de alúmina.



*Figura XLV. Struers SiC-Paper 1000*



*Figura XLVI. Paños de fieltro para pasta de alúmina*



*Figura XLVII. Comparativa microscópica de probeta 3-5 sin pulir (izquierda) y pulida (derecha)*

Tanto el proceso de lijado como el de pulido se efectuaron durante 5 minutos aproximadamente, con una velocidad de giro del disco de 500 rpm.

Tras el proceso se dejaron las piezas en la estufa a 50 °C durante 24 h para proceder al ensayo con las probetas ya secas.



*Figura XLVIII. Piezas fracturadas tras el acondicionamiento*

#### 7.4.2. Descripción del ensayo

En este ensayo se ha hecho uso de los siguientes elementos:

- Microdurómetro Struers Duramin -50 (figura XLIX), éste a su vez consta de:
  - Un indentador Knoop de punta de diamante.
  - Un dispositivo para aplicar carga al indentador con diferentes velocidades.
  - Un microscopio con retícula regulada.
  - Un porta probetas con mecanismo para realizar movimiento horizontal en dos direcciones ortogonales por medio de dos tornillos de ajuste.

Dicho instrumento pertenece al Área de Ciencia de Materiales, y se encuentra ubicado en el Laboratorio de Propiedades Mecánicas de la Universidad de la Laguna.

El ensayo se ha realizado con aquellas probetas de cada serie que mejores resultados a flexión dieron, éstas son: 1-5, 2-1, 3-5, 4-4, 5-1, 6-3.

Para la expresión de la dureza Knoop se emplea la siguiente fórmula:

$$HK = 14,23 \frac{P}{L^2}$$

Donde:

HK es la dureza Knoop, en MPa.

P es la carga sobre el indentador, en N.

L es la longitud de la diagonal más larga de la huella dejada por el indentador, en mm.

Al utilizar esta fórmula, se tiene en cuenta que el resultado se encontrará expresado en MPa, a diferencia de otra fórmula comúnmente usada:

$$HK = \frac{P}{C_p L^2}$$

Donde  $C_p$  es un factor de corrección de la huella de la hendidura (0,070279 idealmente) y P en este caso se expresa en kgf. Lo cual dará un resultado expresado en  $\text{kgf}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

### 7.4.3. Desarrollo del ensayo

Se irán haciendo las incisiones con el indentador de punta de diamante específico para microdureza Knoop.

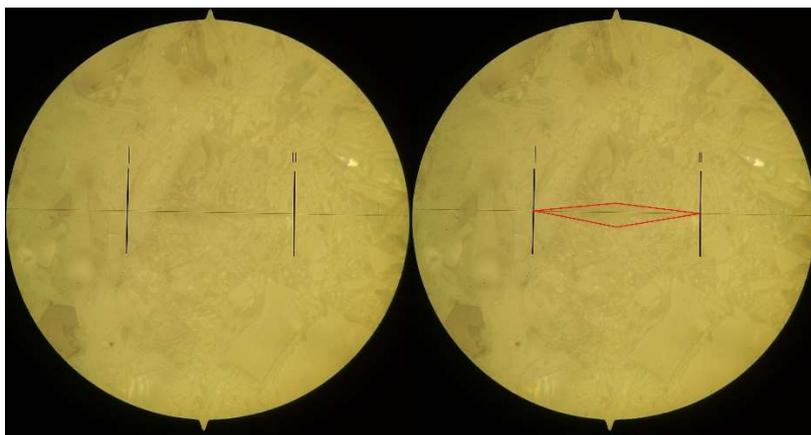


*Figura XLIX. Microdurómetro Struers Duramin*

Una vez pulidas las piezas se procede a determinar la dureza con el microdurómetro, utilizando un indentador piramidal de diamante específico para medir microdureza Knoop, aplicando una fuerza suficiente para que la marca de dicho indentador fuera visible en el microscopio, pero que no se saliera del margen de observación. En nuestro caso, comenzamos aplicando una fuerza de 1,961 N, tal y como exige la norma, en este caso la marca si era visible, pero se excedía del margen de visión y la huella no podía ser medida. Por ello se decidió ir disminuyendo la carga hasta que la huella fuera visible y medible, esto se corresponde con una carga de 0,49 N.

En cada pieza se realizaron un total de 20 indentaciones en línea recta a través de una zona lo suficientemente pulida para que se diferenciara la huella resultante al terminar de ejercer presión. Se aplicó con el indentador la fuerza anteriormente mencionada (0,49 N) durante 20 segundos. Se comprobó tras la realización de cada indentación que fuese claramente visible la muesca resultante a través del microscopio que tiene acoplado el mismo microdurómetro. En el caso de que no fuera así, se realizaba otra indentación desplazando los reguladores de la placa donde se depositaba la probeta un milímetro para que la huella sí se pudiera ver claramente.

Para observar el resultado tras la incisión, se utilizó una lente de microscopio *M40X 0.65 210/-*. Se alineaban las dos líneas verticales en el centro de la imagen con unos reguladores cerca de la lente del microscopio para establecer el cero, y posteriormente se separaban hasta los extremos de la hendidura para medir su longitud.



*Figura L. Indentación realizada con 0,49 N durante 20 segundos visible en el microscopio*

### **7.5. Determinación de la resistencia al choque térmico (UNE-EN 14617-6)**

En este ensayo se evaluarán las modificaciones que puede experimentar la piedra aglomerada bajo los efectos de cambios bruscos de temperatura (choque térmico), como pueden ser la aparición de fisuras, cambio de color, hinchamiento, descamación o exfoliación...

De igual forma, se estudiará la variación de masa que puede surgir tras este proceso, tomando la masa inicial (antes de comenzar el proceso) y la masa tras 15 días de ciclos continuos.

También se estudiará si tras estos ciclos la resistencia a flexión de las muestras se ha visto afectada, realizando de nuevo un ensayo a flexión con cada una de las muestras.

En nuestro caso hemos realizado 15 ciclos en lugar de 20 como dicta la norma, pues con este número de ciclos ya se consideró que no se producirían cambios relevantes en las propiedades de las muestras.

### 7.5.1. Acondicionamiento de las probetas

Antes de comenzar este ensayo, se han acondicionado las probetas dejándolas secar en la estufa a 50 °C hasta que la variación de masa en dos pesadas consecutivas de 24 horas fuera inferior al 0,1%. Posteriormente se ha dejado al aire libre las probetas hasta que se adaptaran a la temperatura ambiente. El ensayo comienza el mismo día tras haber acondicionado las probetas.

### 7.5.2. Descripción del ensayo

En este ensayo se utilizarán los siguientes elementos:

- Estufa capaz de mantener una temperatura constante a 70 °C.
- Un tanque con agua para sumergir las probetas.
- Una pesa con precisión de 0,001 g.
- Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph, preparada previamente para realizar ensayos a flexión.

El ensayo se ha realizado con todas las probetas de las series 3 y 6, para comprobar si los ciclos afectan de forma diferente a las probetas elaboradas con el Molde Vacío y con el Molde Polietileno.

Para estudiar la variación de masa, usaremos la siguiente expresión:

$$\Delta m\% = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \times 100$$

Donde:

$\Delta m$  es la variación de masa, en %.

$m_0$  es la masa antes de realizar el ensayo, en g.

$m_f$  es la masa tras los 15 ciclos, en g.

Para estudiar la variación de la resistencia a flexión, usaremos la siguiente expresión:

$$\Delta R_f \% = \frac{R_f - R_{sf}}{R_f} \times 100$$

Donde:

$\Delta R_f$  es la variación de resistencia a flexión, en %.

$R_f$  es la resistencia a flexión antes de realizar el ensayo, en MPa.

$R_{sf}$  es la resistencia a flexión tras los 15 ciclos, en MPa.

### 7.5.3. Desarrollo del ensayo

Inicialmente se han registrado todos los defectos visibles en las probetas, tanto por la parte superior como la inferior. Tras esto, se han comenzado a realizar los ciclos, depositando las probetas 18 horas en la estufa y 6 horas en el agua. Se ha llevado un registro de todas las horas a las que se cambiaban de lugar las probetas y tras los 15 ciclos se han comprobado los cambios físicos sufridos.

### 7.6. Determinación de la resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad intrínseca de cualquier material que cuantifica la capacidad que tiene un material para oponerse al flujo de la corriente eléctrica. Una baja resistividad indica que un material permite un flujo de corriente eléctrica fácilmente. Sin embargo, un valor alto indica que el material se opone al paso de corriente eléctrica de manera eficaz. Su magnitud normalizada es  $\Omega \cdot m$  (SI).

Este parámetro varía con la temperatura, pero estudiaremos su valor a temperatura ambiente, ya que es la temperatura a la que nuestra piedra aglomerada será utilizada con normalidad.

En nuestro caso, nos interesa que este valor sea lo mayor posible, ya que para el ámbito en el que será utilizado nuestro material debe evitarse en la medida de lo posible el paso de corriente eléctrica.

La resistividad eléctrica del vidrio es del orden de los  $10^{10}$ - $10^{14}$   $\Omega\cdot\text{m}$  [15] en condiciones normales, lo que le convierte en uno de los mejores aislantes eléctricos conocidos. Sin embargo, hay que tener en consideración la mezcla con aglomerante que hemos realizado y comprobar de qué manera afecta a este parámetro.

Para este ensayo no se ha seguido ninguna normativa específica. Sin embargo, se ha seguido otro método fiable para una determinación estimada.

### 7.6.1. Acondicionamiento de las probetas

El presente ensayo se ha realizado en el laboratorio de Baja Frecuencia del Dpto. de Física.

Para preparar las probetas para este ensayo se ha utilizado pasta conductiva de plata para asegurar el correcto contacto de los electrodos con la muestra, entre los que se producirá la corriente continua.

Primeramente, utilizando una guía, se ha distribuido una fina capa de pasta conductiva de plata de manera uniforme con un pequeño pincel por ambos lados de cada muestra, haciendo que coincidan por el lado superior e inferior (figura LI).



*Figura LI. Probetas acondicionadas para realizar el ensayo*

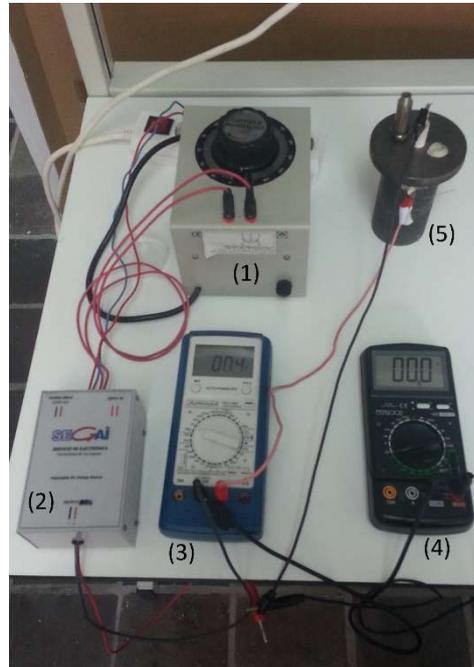
Posteriormente, las probetas se han sometido a un proceso de calentamiento, a  $120$  °C durante media hora para que se produzca la evaporación del disolvente presente en dicha pasta conductiva y poder acoplar los electrodos de manera efectiva.

### 7.6.2. Descripción del ensayo

Para este ensayo se ha hecho uso de los siguientes elementos (figura LII):

- Generador de corriente alterna (1)

- Conversor de corriente alterna a corriente continua (puente Wheatstone) (2)
- Amperímetro (3)
- Voltímetro (4)
- Cápsula con electrodos en su interior (en la que se introducirá la muestra) (5)



*Figura LII. Circuito preparado para la determinación de la resistividad*

Este ensayo se ha realizado sobre las probetas fracturadas y pulidas 1-5, 2-1, 3-5, 4-4, 5-1, 6-3.

Para determinar la resistividad se utilizará la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{V \cdot s}{I \cdot l}$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad, en  $\Omega \cdot m$ .

V es la diferencia de voltaje en los extremos de la muestra, en V.

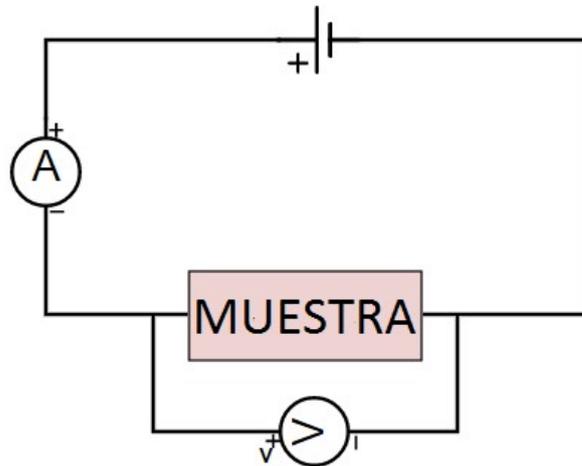
s es el área de los electrodos a través de la cual pasa la corriente, en  $m^2$ .

I es la intensidad continua en circulación por el circuito, en A.

l es el espesor de la muestra, en m.

### 7.6.3. Desarrollo del ensayo

Para la realización del ensayo se ha dispuesto el siguiente circuito:



*Figura LIII. Esquema eléctrico para la determinación de la resistividad*

El generador de corriente alterna se ha ido aumentando hasta que la diferencia de voltaje entre los extremos de la probeta fuera 20, 40 y 60 V. Para cada uno de estos valores se ha anotado la cantidad de corriente que circula por el circuito, y con estos datos, las medidas del espesor de la probeta y el área de los electrodos (medidos con un pie de rey) se ha podido determinar la resistividad de cada muestra, comparando los tres valores y comprobando que no se produce una variación excesiva de la resistividad entre cada medida de una misma muestra.

## 8. Protección individual

Durante el desarrollo del proyecto se utilizó la protección individual requerida para cada ocasión durante el proceso de fabricación de la piedra, como es el caso de guantes, mascarilla y gafas protectoras para la manipulación del polvo de vidrio, así como su triturado y posterior lijado [16].

En el caso de los ensayos, ninguno requería el uso de elementos de protección individual.

## 9. Resultados de los ensayos y análisis de resultados

### 9.1. Microscopía digital

Tras haber hecho capturas de pequeñas porciones de todas las muestras, en alguna de ellas se han visto algunos defectos importantes, como puede ser en la probeta 2-2.

Generalmente no se han encontrado grandes problemas a nivel microscópico en la estructura interna de las probetas. Sin embargo, sí se han percibido algunos hechos que cabe mencionar.

#### 9.1.1. Probetas Molde Vacío (PMV)

La serie 2 es la que mayores problemas presenta, debido a la mala mezcla del vidrio con la resina.

En la probeta 2-2 puede apreciarse la presencia de resina sin solidificar (ver figura LX del ap. 9.3.1).

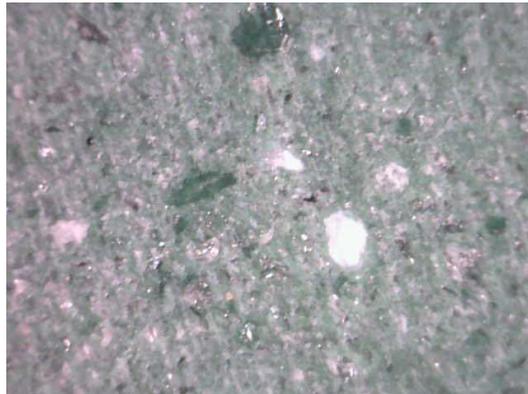
Aún sin haber reacciones graves, en las muestras de la serie 3 se han observado algunos granos de vidrio de diferentes tonalidades (figura LIV). Esto puede deberse a que se ha realizado alguna mezcla no deseada durante el proceso de molido de vidrio. Igualmente, en los ensayos hemos comprobado que no afecta de forma relevante a los resultados el tipo de vidrio utilizado (ya sea CRT-P o CRT-F), así que no le daremos mayor importancia.



*Figura LIV. Probeta 3-3, donde se pueden apreciar ambas tonalidades de vidrio*

### 9.1.2. Probetas Molde Polietileno (PMP)

En este molde no se han dado mayores problemas: la distribución de las partículas de vidrio es uniforme, la resina cumple su función de adhesión con el vidrio, y no se aprecia ningún tipo de reacción no deseada. Aunque cabe destacar que en alguna de las probetas se ha quedado introducido algo de cera desmoldante, como puede apreciarse de forma clara en la figura LV.



*Figura LV. Probeta 6-6. Se puede apreciar la cera introducida en la probeta*

### 9.2. Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua (UNE-EN 14617-1)

Se ha considerado, para el cálculo de estos parámetros, que la densidad del agua a temperatura ambiente es  $997,62 \text{ kg/m}^3$ .

A continuación, se refleja la media de densidad aparente y absorción de agua para todas las probetas ensayadas:

Serie	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )	Absorción de agua (%)
1	2015,12	0,78
2	1909,48	3,44
3	2231,42	1,37
4	2094,27	1,40
5	2135,97	1,24
6	2136,74	0,87

Tabla V. Medidas de densidad aparente y absorción de agua de todas las series

Se puede apreciar en su mayor parte una cierta uniformidad en los datos (exceptuando la serie 2), aunque cabe destacar sobre todo las series 1 y 6 con una importante reducción del porcentaje de absorción de agua respecto al resto de las series. Durante el desmolde de dichas series, pudo apreciarse que se encontraban más compactas que el resto.

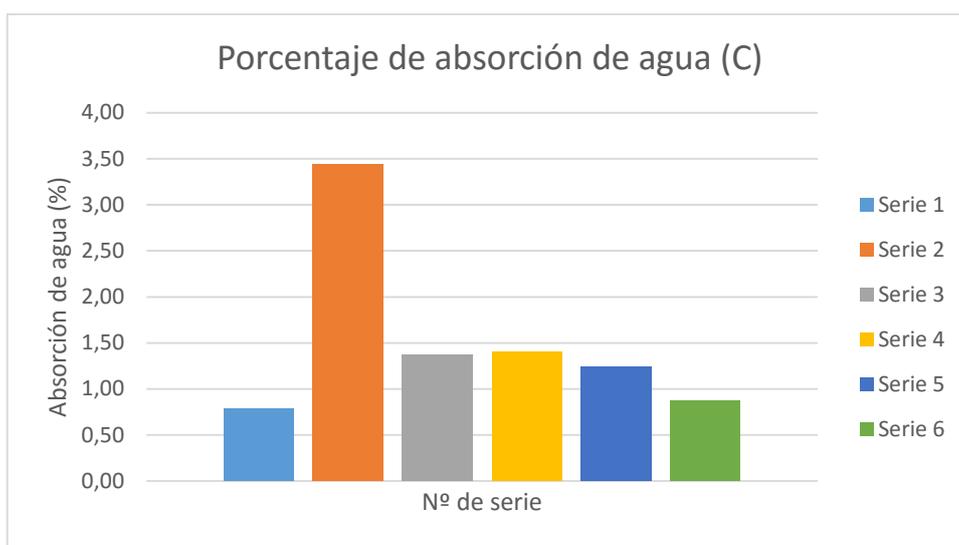
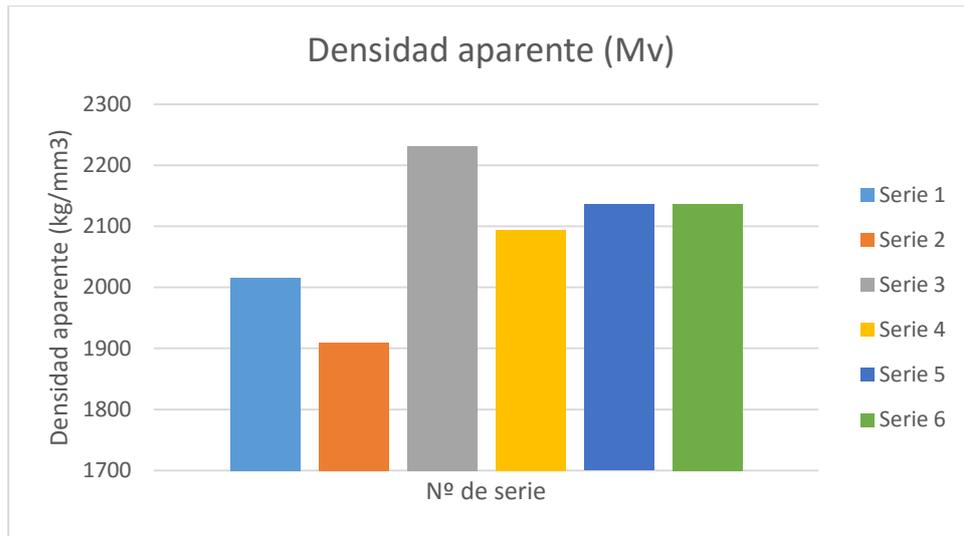


Figura LVI. Gráfica comparativa de absorción de agua



*Figura LVII. Gráfica comparativa de densidad aparente*

### 9.2.1. Probetas Molde Vacío (PMV)

La serie 2 es la que peores resultados ha presentado, debido a la mala mezcla realizada, presenta una peor unión de la masa y por tanto una mayor porosidad, que da lugar a una menor densidad aparente y mayor porcentaje de absorción de agua, por eso se pueden apreciar estos malos resultados tras el ensayo.

La serie 1, en cambio, es dentro de la fabricación ejercida con este molde, la que mejores resultados presenta, ya que se realizó un proceso de mezclado y compresión más satisfactorio que con el resto de series, y esto se refleja en los resultados.

El resto de series presentan resultados bastante similares entre sí, siendo unos parámetros intermedios entre la serie 1 y la 2.

### 9.2.2. Probetas Molde Polietileno (PMP)

Dentro de estas dos series, la serie 5 presenta unos resultados muy similares a los de la serie 3 y 4, es decir, no presenta unos resultados tan satisfactorios como la densidad y absorción de agua de la serie 1, pero tampoco tan alejados de la media como los de la serie 2.

En la serie 6 se puede apreciar una notable mejora respecto a las series anteriores, siendo la serie que mejores resultados ha presentado; Ya que la relación absorción de agua-densidad aparente mejora en relación a la serie 1. En la serie 1 hay poca absorción

de agua, pero la densidad aparente está dentro de la media de todas las series, en cambio, en la serie 6, la absorción de agua aumenta de manera poco significativa, pero la densidad aparente es bastante mayor en relación a la serie 1.

### **9.2.3. Conclusiones tras el ensayo**

Se puede concluir que la absorción de agua se comporta de forma inversamente proporcional a la densidad aparente, y que es preferible que la primera sea lo menor posible, para así evitar, si se diera el caso de la comercialización de la piedra, que cualquier contacto con el agua produjese que la piedra fuera absorbiendo cierta cantidad de la misma y a largo plazo esto afectase a su estructura interna.

La serie que presentó mejores resultados fue la serie 6, ya que cuenta con una absorción de agua considerablemente menor al resto de series, exceptuando la 1, pero a su vez también dispone de mayor densidad aparente que dicha serie, por lo que se considera que los resultados son algo mejores.

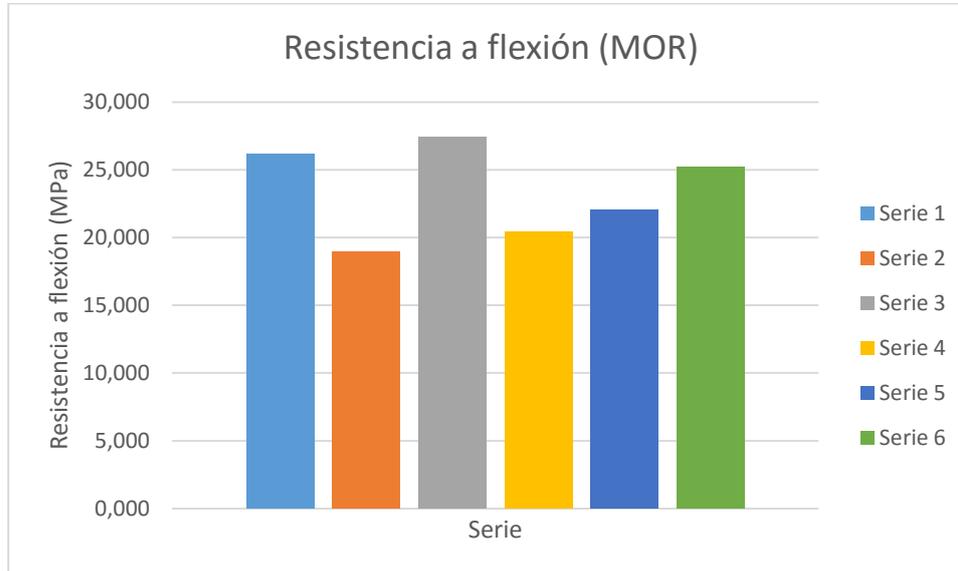
### **9.3. Determinación de la resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2)**

A continuación, se refleja la media tanto de la resistencia como del módulo a flexión de cada serie, recordando que las dos últimas series se fabricaron a partir de aquellas que mejor resultados dieron en el mismo ensayo, haciéndose en periodos distanciados de tiempo. Para la elaboración de la media se han tenido en cuenta 6 muestras en todas las series, excepto la 1 y la 2, en las que se han tenido en cuenta 5 muestras.

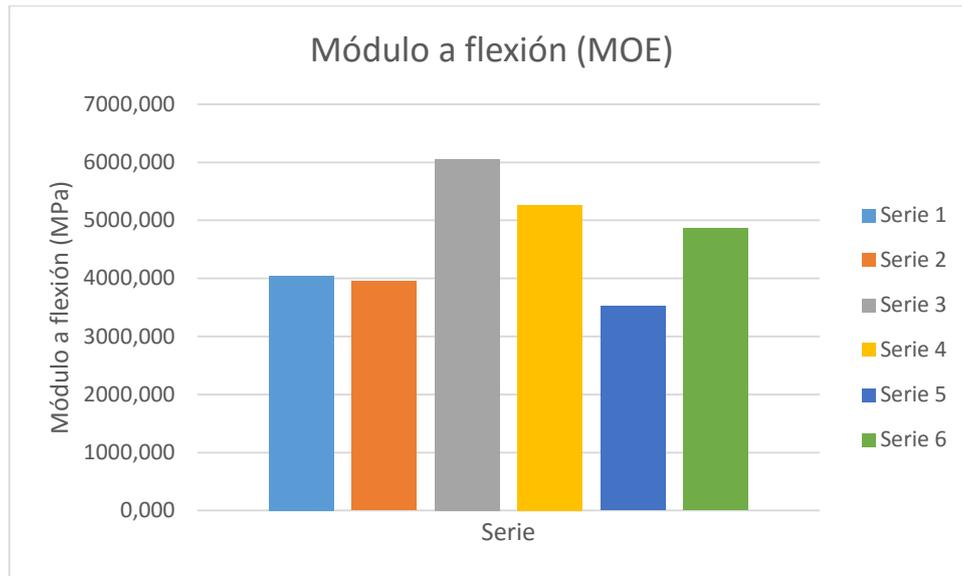
Las resistencias y módulos a flexión de cada muestra individual pueden observarse en el Anexo III.

<b>SERIE</b>	<b>MOR (Media) (MPa)</b>	<b>MOE (Media) (MPa)</b>	<b>MOR (D. típica) (MPa)</b>	<b>MOE (D. típica) (MPa)</b>
<b>1</b>	26,152	4049,290	7,362	1439,481
<b>2</b>	18,975	3950,021	14,441	2535,870
<b>3</b>	27,426	6054,797	3,645	1132,823
<b>4</b>	20,456	5268,516	1,297	763,779
<b>5</b>	22,085	3521,533	5,642	1171,832
<b>6</b>	25,219	4865,330	2,615	874,019

*Tabla VI. Medias y desviaciones típicas de los parámetros MOR y MOE*



*Figura LVIII. Gráfica comparativa de resistencia a flexión*



*Figura LIX. Gráfica comparativa de módulo a flexión*

### 9.3.1. Probetas Molde Vacío (PMV)

Como se puede observar, la serie 2 es la que menor resistencia a flexión presenta. En las últimas probetas (desde la 2-4 hasta la 2-6) se observaba una mayor fragilidad, hasta el punto de llegar a quebrarse la probeta 2-6 en el desmolde. Se puede observar una dispersión de datos muy alta en su desviación típica (tabla VI), debido a los malos resultados de las últimas probetas (la 2-4 y 2-5).

De igual forma, las probetas 2-1 y 2-2 individualmente, son dos de las que mejor resultado han presentado en dicho ensayo (anexo III), pero esta serie ha presentado ciertos inconvenientes al secarla en la estufa para el acondicionamiento del ensayo, pues la resina al no estar bien mezclada se percibía en la superficie de las probetas, quedando al tacto algo viscoso.



*Figura LX. Probeta 2-2, en la que se aprecia la resina fuera de la masa*

La serie 3 es la que mejor resistencia media a flexión ofrece. Pues se subsanaron los errores cometidos en las anteriores series (la bomba de vacío funcionaba correctamente y la masa quedó compacta dentro del molde).

Cabe destacar la resistencia a flexión de la probeta 1-5 (37,485 MPa) y su módulo a flexión (6060,458 MPa), una de las que mejores resultados ha dado en este ensayo, descartando la probeta 2-1, que ha presentado unos resultados algo superiores, pero se descarta por los fallos mencionados anteriormente.

Al medir cada mitad tras quebrarse todas las probetas no se observó una gran distancia (siempre menos de 1 cm) entre el punto en el que se ejercía la presión y el lugar de rotura.

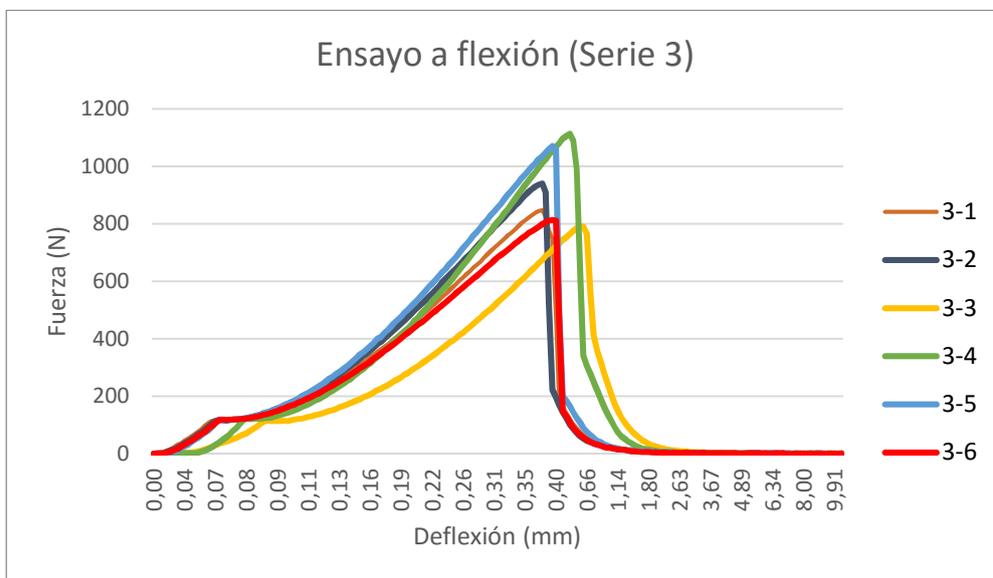


Figura LXI. Gráfica comparativa de ensayo a flexión de la serie 3

En la serie 3 (figura LXI) los resultados entre cada probeta son bastante similares, esto indica que las dimensiones de las probetas han sido bastante uniformes en esta serie, así como la distribución de presiones. Puede apreciarse al principio de todas las probetas un pequeño escalón, la pequeña región recta tras el mismo es lo que se conoce como plasticidad perfecta o fluencia. Tras este punto, se comienza el régimen plástico del material, hasta que alcanza el punto de rotura (entre los 0,40 y 1,14 mm tras comenzar a aplicar presión en la superficie de la probeta).

### 9.3.2. Probetas Molde Polietileno (PMP)

Las series de este molde han presentado resultados bastante similares respecto a las probetas del Molde Vacío.

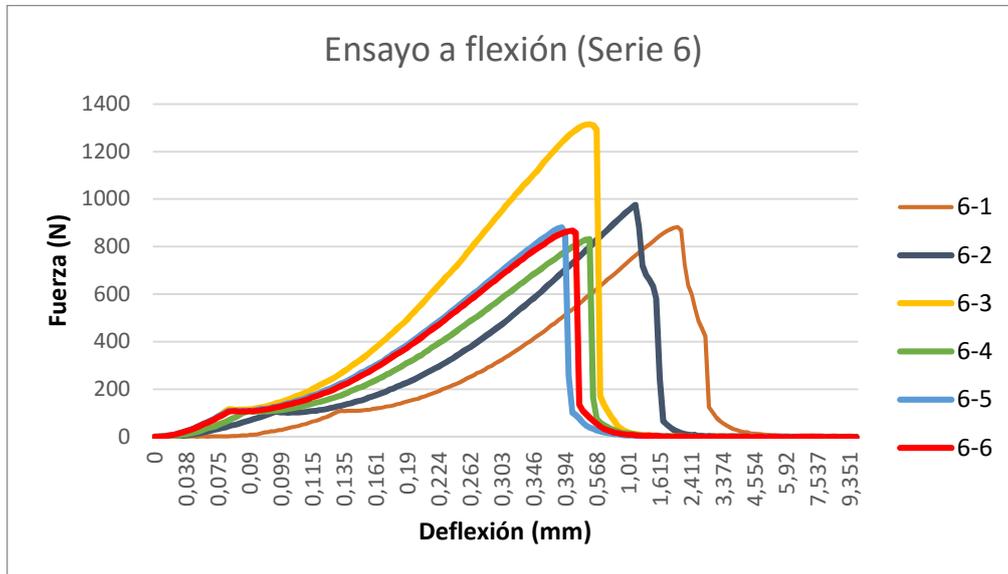


Figura LXII. Gráfica comparativa de ensayo a flexión de la serie 6

La serie 6 ha presentado unos buenos resultados, ya que presenta una resistencia a flexión un poco por debajo de la de la serie 1 y un módulo a flexión bastante superior, con lo que se deduce, tras el ensayo, que la relación entre ambas es mejor en la serie 6 que en la 1.

Se puede observar en la gráfica comparativa (Figura LXII) que en este caso los resultados difieren bastante, lo cual indica que la distribución de presión no se ha ejercido de manera uniforme en las probetas, pues algunas presentan mayor compactación que otras, y por tanto presentan diversidad de grosores. Se produce la ruptura de casi todas las probetas en el margen de 800 a 1000 N excepto la probeta 6-3, que llegó a algo más de 1300 N, esto se debe a que el grosor de la probeta era mayor en este caso, lo cual ya se analizó previamente (ap. 6.3.4).

Los resultados individuales para cada probeta, así como sus gráficas comparativas pueden observarse en el Anexo III.

### 9.3.3. Conclusiones tras el ensayo

Se concluye que todas las probetas dentro de una misma serie presentan resultados muy similares en cuanto a resistencia a flexión, cuya desviación típica es pequeña, exceptuando las dos últimas series elaboradas con el Molde Polietileno, en las cuales se producía la fractura de la probeta en un intervalo de fuerzas mucho más amplio que en el resto de series (Anexo III). Esto se debe a la distribución no uniforme de presión ejercida durante el proceso de curado de las probetas y, por consiguiente, la diversidad de grosores dentro de una misma serie.

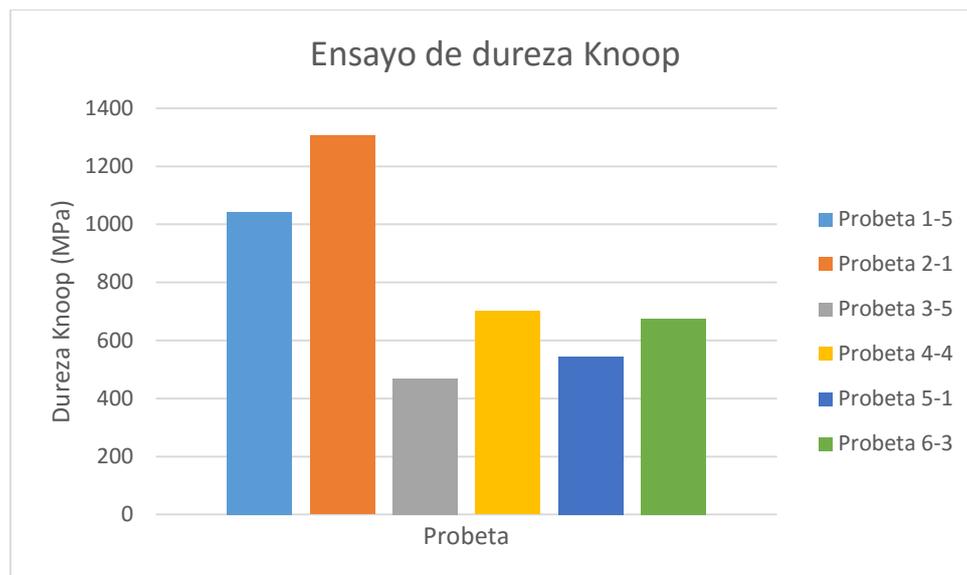
De igual forma, la mala mezcla de materias primas producida en la serie 2, ha dado como resultado que 4 de las probetas ensayadas hayan quebrado al habersele ejercido una presión mucho menor que al resto, sin llegar a superar ninguna de ellas los 400 N.

### 9.4. Determinación de la dureza Knoop (UNE-EN 14205)

Para el cálculo de la microdureza Knoop de una muestra se ha hecho la media de todas las durezas resultantes en esa muestra, tras haberlas calculado en cada una de las indentaciones.

Probeta	Dureza Knoop (HK) (MPa)
1-5	1042,373
2-1	1304,971
3-5	469,389
4-4	701,486
5-1	544,961
6-3	676,100

*Tabla VII. Dureza Knoop media*



*Figura LXIII. Gráfica comparativa de la dureza Knoop media*

En este ensayo no se ha tenido en cuenta la desviación típica pues al haber obtenido resultados tan dispares entre sí se produce una desviación muy elevada, dando lugar en ocasiones a que el valor representativo (media  $\pm$  desviación típica) sea un valor negativo (consultar anexo V).

#### **9.4.1. Probetas Molde Vacío (PMV)**

Los resultados obtenidos en cuanto a las cuatro primeras series no son nada uniformes, destacando las dos primeras series sobre el resto.

La probeta 2-1 presenta una dureza mucho mayor que el resto, esto se debe a que algunas de sus indentaciones se realizaron justo en un trozo de vidrio que ocupaba el rango de aplicación de presión del indentador. La muesca resultante en este material es mucho menor que en una zona donde se ve una mezcla entre la resina y el vidrio, y es por ello que la media de esta muestra ha aumentado considerablemente.

En cambio, la serie 3 tiene una dureza media mucho menor que el resto, siendo las huellas del indentador bastante más uniformes que en el resto de los casos, oscilando entre 0,11~0,20 mm.

#### **9.4.2. Probetas Molde Polietileno (PMP)**

En la serie 5 se aprecian resultados algo más uniformes, en concordancia también con la serie 4 y 3.

Las diagonales mayores de las huellas en estas dos series (la serie 5 y la 6) oscilaban entre valores de 0,10 y 0,19 mm, sin llegar a superar en ningún caso los 0,20 mm.

En este caso no se realizó ninguna intentación en un fragmento puro de vidrio, así que se deduce que debido a ello se han producido estos resultados con mayor uniformidad.

#### **9.4.3. Conclusiones tras el ensayo**

Tras analizar los resultados se puede ver que los mismos son algo uniformes, a excepción de aquellas probetas en las que alguna de sus indentaciones se realizó en un trozo de vidrio, en las cuales la dispersión de datos aumenta considerablemente.

Por ello, se ha podido comprobar que la determinación de este tipo de dureza en piedra aglomerada no es del todo exacta, ya que, si algunas indentaciones la marca coincide justo en un fragmento de vidrio de la probeta, el resultado se ve alterado.

Se concluye que, la norma para la Determinación de la dureza Knoop para piedra natural (UNE-EN 14205) no es fiable para tomar conclusiones determinantes en cuanto a la dureza de piedra aglomerada, ya que ha sido enunciada para la aplicación de dicho ensayo exclusivamente en piedra natural.

Sin embargo, si tenemos en cuenta aquellas muestras donde el indentador no tuvo unos resultados muy dispares a lo largo de las 20 indentaciones, se puede concluir que la dureza puede oscilar en torno a valores de 469~701 HK, siendo el resultado expresado en MPa.

#### **9.5. Determinación de la resistencia al choque térmico (UNE-EN 14617-6)**

Tras la realización de 15 ciclos no se ha observado variación en cuanto a aparición de grietas u otros defectos en las piedras, en cuanto a sus propiedades mecánicas se ha medido de nuevo la masa, así como su resistencia a flexión, comparándolos directamente con los obtenidos previos al ensayo, dando los siguientes resultados:

SERIE	$\Delta m$ (%)	$\Delta R_f$ (%)
3	0,49	30,24
6	0,44	5,55

Tabla VIII. Medidas de variación de masa y resistencia a flexión de las series 3 y 6

Los resultados de esta tabla se han obtenido a partir de las medias de todas las variaciones de masa y resistencia a flexión de cada muestra individual, las cuales pueden consultarse en el Anexo VI del presente proyecto.

#### 9.5.1. Probetas Molde Vacío (PMV)

Puede apreciarse que la variación de masa es mínima, no superando los 0,4 g de variación en ninguna de las muestras medidas.

En cuanto a la variación de la resistencia a flexión, ésta se ha visto afectada en gran medida, ya que se ha visto drásticamente disminuida en comparación a los ensayos realizados antes de la prueba de resistencia al choque térmico.

#### 9.5.2. Probetas Molde Polietileno (PMP)

En la serie 6 puede apreciarse una diferencia similar de la masa, igualmente no superando los 0,4 g de variación en ninguno de los casos. Sin embargo, se ha visto que la resistencia a flexión ha disminuido, pero no de manera tan extrema como en el caso del Molde Vacío. La única excepción a la disminución de resistencia a flexión tras este ensayo se produce en la probeta 6-3, en la que dicha resistencia aumenta un 0,8% (consultar anexo VI).

#### 9.5.3. Conclusiones tras el ensayo

Se puede comprobar que la aplicación de continuos ciclos de choque térmico no afecta a las propiedades visuales de la muestra. Sin embargo, las propiedades mecánicas si se ven afectadas en cierta medida, produciéndose una variación mínima de masa.

En cuanto a la variación de resistencia a flexión, la serie 3 presentó unos resultados desfavorables a tener en cuenta. Por el contrario, la serie 6 presenta unos resultados con

los que podemos concluir que tras dichos ciclos no se produce una pérdida relevante de capacidades de resistencia ante agentes externos que produzcan flexión.

### 9.6. Determinación de la resistividad eléctrica

Para la determinación de la resistividad eléctrica, se han tomado tres medidas variando la diferencia de voltaje que se aplica a cada muestra (ap. 7.6.3) y se ha hecho la media de esos tres valores, obteniendo los siguientes resultados:

Probeta	Resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot m$ )
1-5	$5,93 \cdot 10^4$
2-1	$3,35 \cdot 10^4$
3-5	$2,21 \cdot 10^4$
4-4	$3,00 \cdot 10^4$
5-1	$5,61 \cdot 10^4$
6-3	$3,65 \cdot 10^4$

Tabla IX. Resumen de resistividad eléctrica

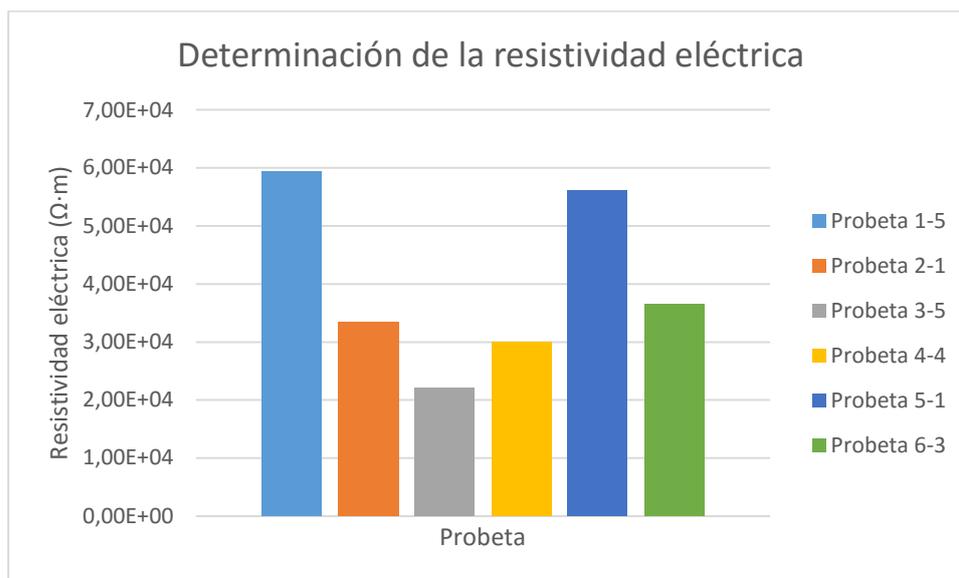


Figura LXIV. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica media

En el Anexo VII se puede ver una tabla con los valores individuales que se han tomado para cada medida de voltaje.

### **9.6.1. Probetas Molde Vacío (PMV)**

En las cuatro primeras series puede verse que los resultados no son muy uniformes entre las probetas, siendo la probeta 1-5 la que mayor resistividad presenta. Esto puede deberse a la porosidad de la piedra, ya que se deduce que cuanto más porosa sea la misma, se opondrá en mayor medida al paso de la corriente eléctrica. Las probetas 2-1 y 4-4 presentan un resultado bastante similar (Anexo VII).

### **9.6.2. Probetas Molde Polietileno (PMP)**

En cuanto a las dos últimas series, tampoco se producen resultados uniformes, a pesar de haber sido elaboradas con la misma granulometría y haber presentado resultados uniformes en cuanto a densidad aparente.

### **9.6.3. Conclusiones tras el ensayo**

Al no haber obtenido resultados muy similares, se deduce que se ha producido algún nivel de error importante a la hora de medir los valores, ya que el puente de diodos aplicaba tensión continua, pero oscilaba continuamente el voltaje mostrado en el voltímetro.

De igual forma, en ocasiones, era necesario aumentar en gran medida el voltaje del generador de alterna para llegar a obtener el voltaje deseado en los extremos de la muestra, esto puede deberse a que la aplicación de la pasta conductora no coincidía exactamente con la posición de los electrodos dentro de la cápsula.

A pesar de no haber obtenido resultados muy exactos, se puede deducir que la aplicación de resina epóxica al vidrio como aglomerante disminuye considerablemente la resistividad propia del vidrio; Pasando de valores de  $10^{10}$ - $10^{14}$  a valores en torno al orden de  $10^4$ .

## 10. Resumen de resultados y comparativas

### 10.1. Resumen de resultados

Tras la realización de los ensayos, y haciendo la media de los parámetros de todas las series realizadas con un mismo molde, hemos obtenido los siguientes resultados:

<b>Probetas Molde Vacío (PMV)</b>	
Absorción de agua (%)	0,78-3,44
Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )	1909-2231
Resistencia a flexión (MOR) (MPa)	19-27
Módulo a flexión (MOE) (MPa)	3950 -6055
Dureza Knoop (HK) (MPa)	469 -1305
Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	$2,21 \cdot 10^4$ - $5,93 \cdot 10^4$

Tabla X. Parámetros medios en Molde Vacío (considerando la serie 2)

<b>Probetas Molde Polietileno (PMP)</b>	
Absorción de agua (%)	0,87-1,24
Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )	2136-2137
Resistencia a flexión (MOR) (MPa)	22,40-25,22
Módulo a flexión (MOE) (MPa)	3521-4865
Dureza Knoop (HK) (MPa)	545-676
Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	$3,65 \cdot 10^4$ - $5,61 \cdot 10^4$

Tabla XI. Parámetros medios en Molde Polietileno

Los datos se han agrupado sin tener en consideración si una serie está conformada a partir de CRT-P o de CRT-F, ya que como se ha comprobado en los ensayos, no hay diferencias apreciables entre ambos tipos de vidrio.

Aunque en el Molde Polietileno sólo se han tenido en consideración dos series en lugar de cuatro, como en el Molde Vacío, puede apreciarse una leve mejora de los parámetros estudiados (menor absorción de agua, mayor resistencia a flexión), la dureza Knoop media se ha visto reducida en el Molde Polietileno, pero no de manera drástica y entra dentro de los márgenes esperados de dureza.

A pesar de todo, los resultados entre ambos moldes no distan demasiado entre sí, y cabe señalar que en el cálculo de la media de los parámetros del Molde Vacío se tuvo en cuenta la serie 2, en la cual se produjo una mala mezcla de material a la hora de elaborar las probetas.

Si no tenemos en consideración los resultados de la serie 2, las medias de los parámetros del Molde Vacío son los siguientes:

<b>Probetas Molde Vacío (PMV)</b>	
Absorción de agua (%)	0,78-1,40
Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )	2015-2231
Resistencia a flexión (MOR) (MPa)	20,46-27,43
Módulo a flexión (MOE) (MPa)	4049-6054
Dureza Knoop (HK) (MPa)	469-1042
Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	$2,21 \cdot 10^4$ - $5,93 \cdot 10^4$

*Tabla XII. Parámetros medios en Molde Vacío (sin considerar la serie 2)*

Como vemos en este caso, los parámetros como son la absorción de agua, resistencia a flexión y dureza mejoran significativamente.

## 10.2. Comparativa con valores comerciales

Se ha tenido en cuenta la empresa Silestone Cosentino a la hora de hacer la comparativa de propiedades mecánicas de nuestra piedra con la que se encuentra en comercialización actualmente. Esto es debido a que dicha empresa también se basa en la fabricación de encimeras a partir de vidrio reciclado, como puede ser el propio vidrio de deshecho que hemos utilizado a lo largo de este proyecto.

Como ventaja, dicha empresa ha hecho uso de las mismas normas a la hora de realizar sus ensayos.

Ensayo	Norma	UD	Valor
Densidad aparente	UNE-EN-14617-1	kg/m <sup>3</sup>	2.412
Absorción agua	UNE-EN-14617-1	%	0,04 W <sub>4</sub>
Resistencia a la flexión	UNE-EN-14617-2	MPa	47,7 F <sub>4</sub>
	Desviación estándar	MPa	2,4
	Valor mínimo esperado	MPa	42,6
Resistencia al impacto	UNE-EN-14617-9	cm/J	42/4,1
Resistencia a la abrasión	UNE-EN-14617-4	mm	26,0 A <sub>4</sub>
Resbaladidad (pulido)	UNE-EN-14231	PSRV en húmedo	9
		PSRV en seco	51
Resbaladidad (suede)	UNE-EN-14231	USRV en húmedo	11
		USRV en seco	35
Resistencia al envejecimiento por choque térmico	UNE-EN-14617-6	% var.mod.elástico	5,2
		% variación masa	0,00
Resistividad eléctrica	UNE-EN-14617-13	TΩ/m (1000V) transversal	34,4
		TΩ/m (1000V) superficial	1040
Conductividad térmica	UNE-EN-12524	W/m·K	1,3
Coefficiente de dilatación térmica	UNE-EN-14617-11	°C <sup>-1</sup>	33,9·10 <sup>-6</sup>

Tabla XIII. Valores comerciales de la Familia II de Silestone Cosentino [17]

De la presente tabla podemos comparar las siguientes propiedades, omitiendo la serie 2 y siendo el primer dato mencionado el referente al comercial y el segundo el referente al presente proyecto:

- Densidad aparente: 2.412 kg/m<sup>3</sup> frente a ~2.150 kg/m<sup>3</sup>
- Absorción de agua: 0,04% frente a ~0,80%

- Resistencia a flexión: 47,7 MPa frente a ~25 MPa
- Resistencia al envejecimiento por choque térmico:
  - Variación del módulo elástico: 5,2% frente a ~17%
  - Variación de la masa: 0,00% frente a ~0,45%
- Resistividad eléctrica transversal:  $34,4 \cdot 10^{12} \Omega \cdot m$  frente a  $\sim 4,50 \cdot 10^4 \Omega \cdot m$

Al no encontrar presente la medida de dureza Knoop en la ficha técnica, se ha efectuado dicha medida para una muestra comercial de la empresa Compac, y tras 20 indentaciones la dureza media toma un valor de 2153,06 (MPa), siendo un resultado mucho mayor que las muestras elaboradas.

## 11. Conclusiones globales

### 11.1. Español

Tras la fabricación de todas las series y realización de sus respectivos ensayos llegamos a las siguientes conclusiones generales:

- La utilización de vidrio CRT-P o CRT-F no afecta a las propiedades mecánicas finales, aunque sí a propiedades estéticas.
- No hay gran diferencia entre las probetas elaboradas con el Molde Vacío y las elaboradas con el Molde Polietileno. Debería producirse una mejora significativa de las propiedades en el primero, pero debido a diversos factores que producen un malfuncionamiento del molde, no es así.
- Los resultados varían de manera relevante entre series, pero no dentro de una misma serie.
- Una distribución de presiones homogénea es importante a la hora de la compactación de la masa.
- El proceso de horneado durante el curado no afecta de manera relevante a las propiedades mecánicas finales.
- La dureza de la piedra no se puede determinar de manera efectiva según norma ya que no hay normativa específica para piedra aglomerada.
- La variación brusca de temperatura no afecta a las propiedades estéticas de la piedra, pero sí a las mecánicas.

- El proceso de vibración presente en industrias durante la elaboración del producto podría favorecer a las propiedades finales de la piedra.

En cuanto a las conclusiones individuales cabe destacar las siguientes:

- La mala mezcla produce malas propiedades en la probeta final, destacando la serie 2, en la cual llegó a quebrarse una de ellas (probeta 2-6).
- Suele producirse dentro de cada serie en un ensayo concreto un gran incremento respecto a la media de la de la propiedad que se estudia (probeta 1-5 en el ensayo a flexión), es por ello que debe escogerse un número de muestras representativa del conjunto (6 probetas) o un número de ensayos representativo dentro de una misma muestra (20 indentaciones para la dureza Knoop).

## 11.2. English

After produce all series and conducting their tests, we reach the following general conclusions:

- The use of CRT-P or CRT-F glass does not affect the final mechanical properties, although to aesthetic properties.
- There is no great difference between the samples elaborated with the Vacuum Mold and elaborated with the Polyethylene Mold. A significant improvement of the properties in the first mold should occur, but due to various factors that cause the malfunction of the mold, it did not occur.
- Results vary relevantly between series, but not within the same one.
- A uniform distribution of pressure is important when compacting the mass.
- The baking process during curing is no relevant to the final mechanical properties.
- The hardness of the stone cannot be effectively determined according to standard, because there are not specific regulations for agglomerated stone.
- The sudden change in temperature does not affect the aesthetic properties of the stone, but the mechanical.
- The process of vibration present on industries during product development could favor the final properties of the stone.

As for the individual conclusions, we can include the following:

- The bad mixing produces bad properties in the final sample, highlighting the series 2, which came to break one of them (sample 2-6).
- Usually occurs within each series in a particular test a large increase over the average property that is being studied (sample 1-5 in the flexural test), which is why it should be chosen a representative number of samples (6 specimens) or a representative number of tests within a single sample (20 Knoop hardness indentations).

## 12. Bibliografía

### Fuentes de recursos:

- [1] María de León González. Trabajo de Fin de Grado. Septiembre 2015. Fabricación de piedra artificial a partir de residuos.
- [2] Beatriz Rivero López. Proyecto de Fin de Carrera. 2011. Fabricación de mortero de albañilería con sustitución de los áridos por arena de vidrio plano reciclado.
- [3] Trilles-Lázaro, V.R.; Allepuz, S. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Abril 2011. Reutilización de vidrio reciclado y residuos cerámicos en la obtención de gres porcelánico. Eco-logik.
- [4] BOE. 2015. RAEE, Nuevo Real Decreto 110/2015 sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE).
- [5] Acabado de encimeras de Silestone Cosentino con vidrio reciclado. URL: <https://www.architonic.com/es/products/vidrio-reciclado/0/3231392/1>
- [6] Residuos Profesional. 2015. EE. UU. y China encabezan la generación de residuos electrónicos. URL: <http://www.residuosprofesional.com/ee-uu-y-china-los-principales-generadores-de-residuos-electronicos/>
- [7] El País. 2013. La pantalla plana deja obsoleto el reciclaje de televisores. URL: [http://tecnologia.elpais.com/tecnologia/2013/05/08/actualidad/1368035386\\_496593.html](http://tecnologia.elpais.com/tecnologia/2013/05/08/actualidad/1368035386_496593.html)
- [8] Fabricación industrial Silestone Cosentino. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=yYgmZbcE\\_Y0](https://www.youtube.com/watch?v=yYgmZbcE_Y0)
- [9] Propiedades mecánicas del vidrio. URL: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glosario/propiedades-del-vidrio>
- [10] Propiedades de la resina epóxica. URL: [http://contenidos.educarex.es/mci/2009/43/TEMA2/resina\\_epoxidicas.pdf](http://contenidos.educarex.es/mci/2009/43/TEMA2/resina_epoxidicas.pdf)
- [11] Ficha técnica Bomba de Vacío. Página 25. URL: <http://simslu.es/uploads/secure/74/4/CATALOGO%20STAG%202013.pdf>

- [12] Modelo elástico lineal. URL: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/deformacion-y-asientos-de-los-suelos-1-elasticidad-y-plasticidad/>
- [13] Material Hardness. URL: [http://www.calce.umd.edu/TSFA/Hardness\\_ad\\_.htm](http://www.calce.umd.edu/TSFA/Hardness_ad_.htm)
- [14] Dureza Knoop de diversos materiales. URL: [https://es.wikipedia.org/wiki/Escala\\_de\\_Knoop](https://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Knoop)
- [15] Resistividad eléctrica de materiales. URL: <http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/resistividad.htm>
- [16] Protección individual para trabajos con riesgo de inhalación de polvo. URL: <http://www.icv.csic.es/prevencion/Documentos/manuales/polvo.pdf>
- [17] Ficha técnica Silestone Cosentino, familia II. URL: <http://content.cosentino.com/alldocuments/silestone/technical-info/ft/silestone-technical-datasheet-fam-II-ES.pdf>
- [18] Technical Data Sheet SUPER SAP 100 Epoxy – High-Bio-Content General Purpose Liquid Epoxy Resin. URL: [http://shop.entropyresins.eu/attachment.php?id\\_attachment=5](http://shop.entropyresins.eu/attachment.php?id_attachment=5)
- [19] Technical Data Sheet Ohaus Pioneer Analytical and Precision Balances. URL: [http://www.keison.co.uk/products/ohaus\\_scales/Pioneer.pdf](http://www.keison.co.uk/products/ohaus_scales/Pioneer.pdf)

#### Normativa:

- [20] UNE-EN 14618. Piedra aglomerada: Terminología y clasificación. Aenor Ediciones 2011.
- [21] UNE-EN 14205. Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la dureza Knoop. Aenor Ediciones 2004.
- [22] UNE-EN 14617. Piedra aglomerada, métodos de ensayo.
- [23] UNE-EN 14617-1. Piedra aglomerada, métodos de ensayo: Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua. Aenor Ediciones 2013.
- [24] UNE-EN 14617-2. Piedra aglomerada, métodos de ensayo: Determinación de la resistencia a flexión. Aenor Ediciones 2008.

[25] UNE-EN 14617-6. Piedra aglomerada, métodos de ensayo: Determinación de la resistencia al choque térmico. Aenor Ediciones 2012.

[26] UNE-EN 14617-13. Piedra aglomerada, métodos de ensayo: Determinación de la resistividad eléctrica. Aenor Ediciones 2013.

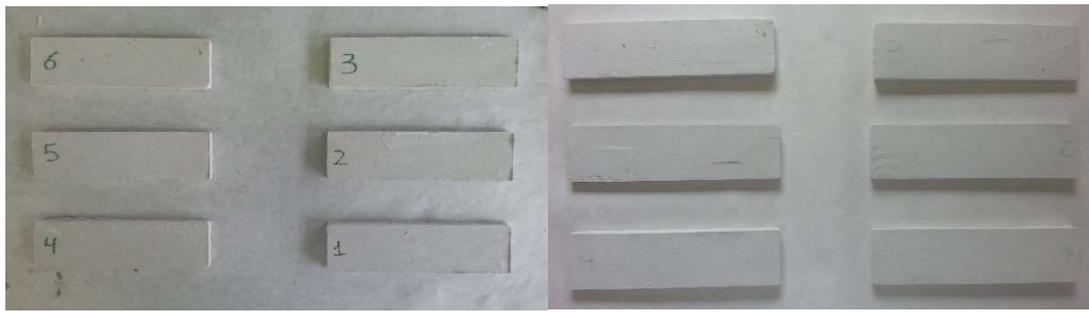
**PARTE II:**

**ANEXOS**

**ANEXO I**

**FOTOGRAFICO Y MICROSCOPIA  
DIGITAL**

Serie 1:



Serie 1 tras desmolde

Serie 1 tras lijado

Serie 2:



Serie 2 tras desmolde

Serie 2 tras lijado

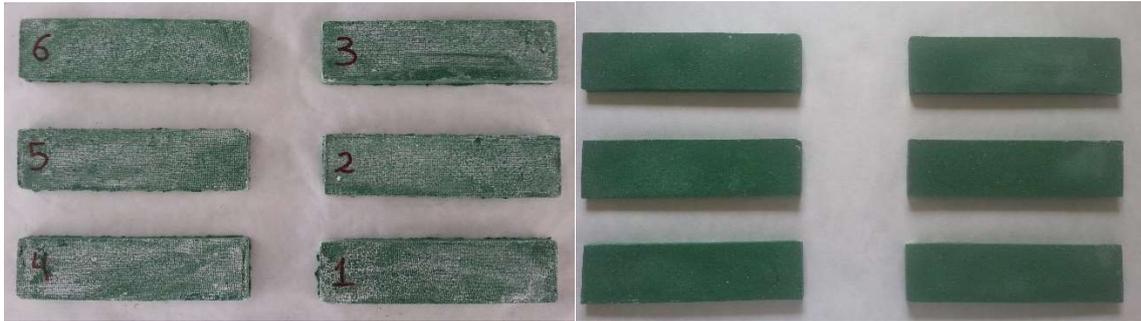
Serie 3:



Serie 3 tras desmolde

Serie 3 tras lijado

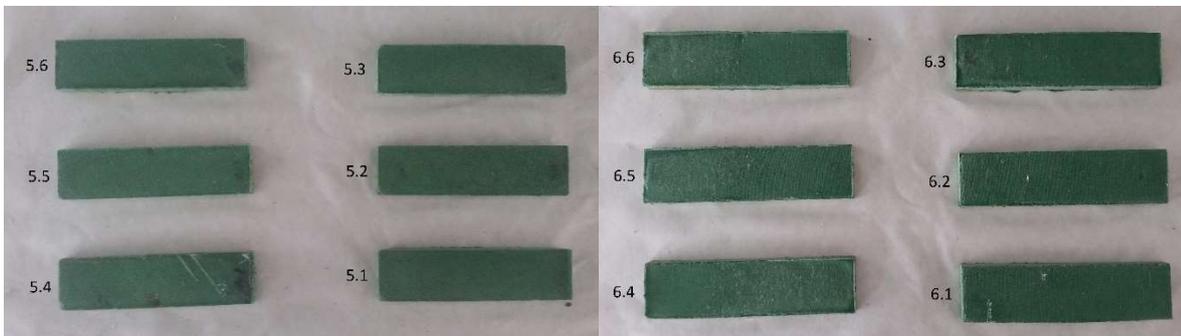
Serie 4:



Serie 4 tras desmolde

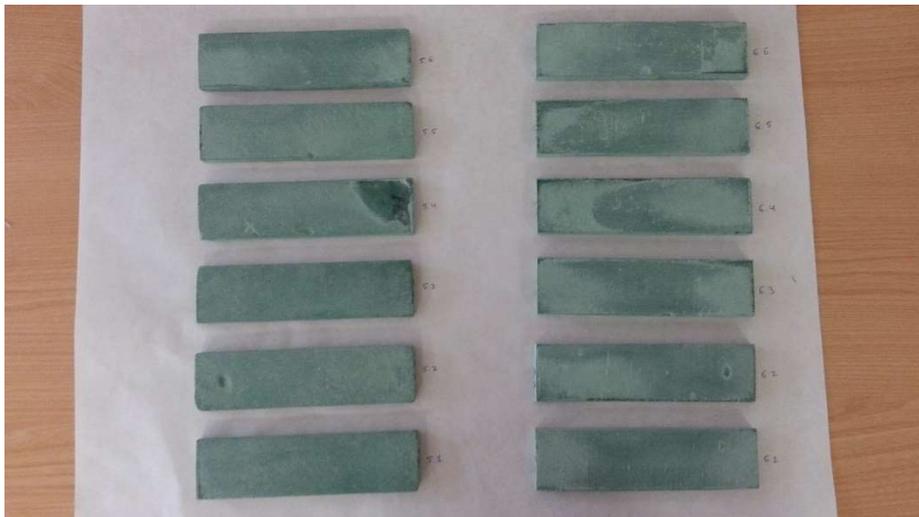
Serie 4 tras lijado

Serie 5 y 6:



Serie 5 tras desmolde

Serie 6 tras desmolde

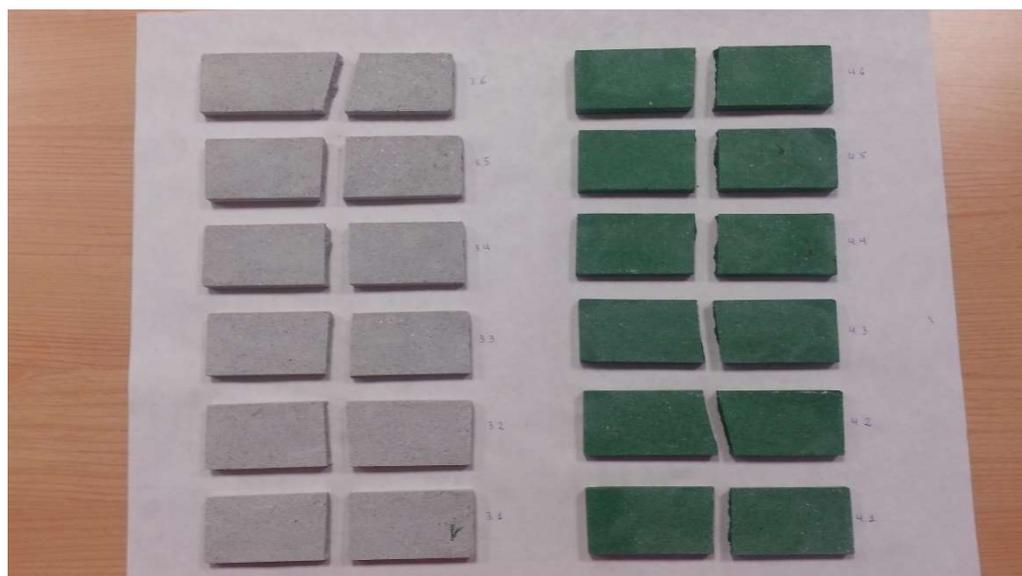


Series 5 y 6 tras lijado

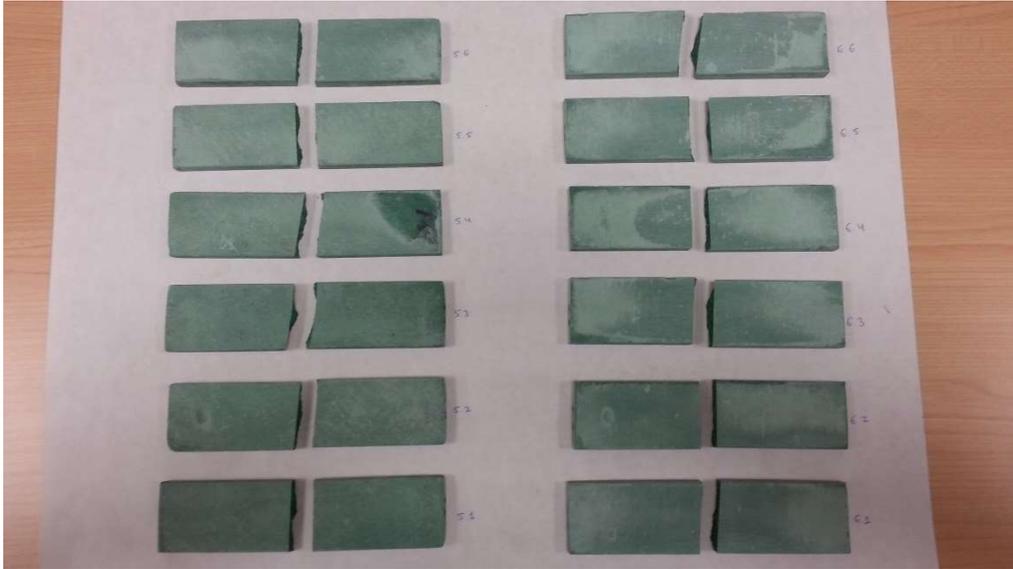
Ensayo a flexión:



Series 1 y 2 tras los ensayos a flexión



Series 3 y 4 tras los ensayos a flexión



Series 5 y 6 tras los ensayos a flexión

Dureza Knoop:



Probetas fracturadas para efectuar el ensayo de dureza Knoop



Probeta 1-5 antes de pulir (izquierda) y pulida (derecha)



Probeta 2-1 antes de pulir (izquierda) y pulida (derecha)



Probeta 3-5 antes de pulir (izquierda) y pulida (derecha)

Microscopía digital (Ampliación x60):



Probeta 1-1

Probeta 1-2

Probeta 1-3



Probeta 1-4

Probeta 1-5

Probeta 1-6



Probeta 2-1

Probeta 2-2

Probeta 2-3



Probeta 2-4

Probeta 2-5

Probeta 2-6



Probeta 3-1

Probeta 3-2

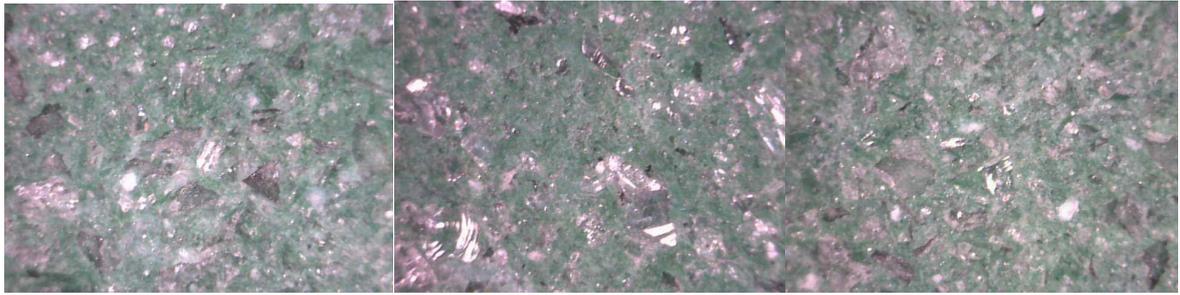
Probeta 3-3



Probeta 3-4

Probeta 3-5

Probeta 3-6



Probeta 4-1

Probeta 4-2

Probeta 4-3



Probeta 4-4

Probeta 4-5

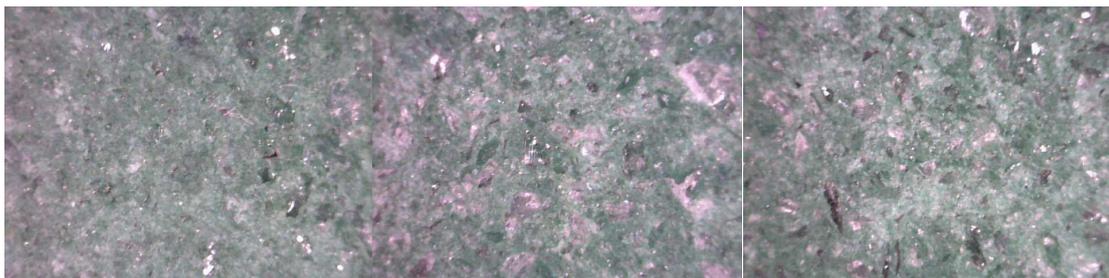
Probeta 4-6



Probeta 5-1

Probeta 5-2

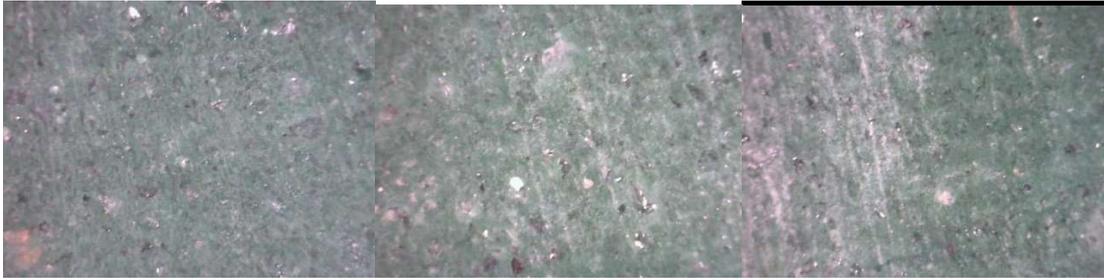
Probeta 5-3



Probeta 5-4

Probeta 5-5

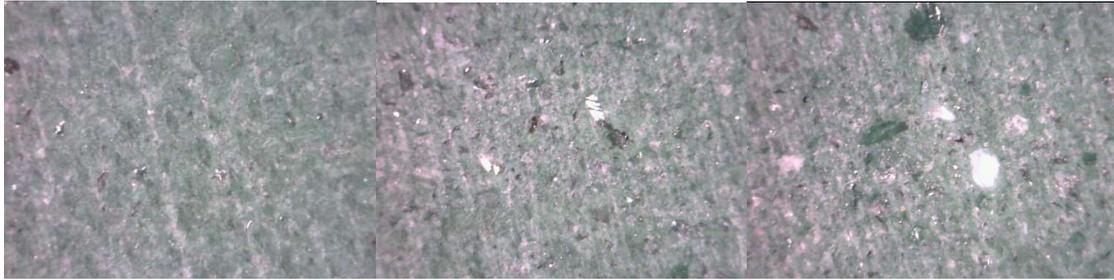
Probeta 5-6



Probeta 6-1

Probeta 6-2

Probeta 6-3



Probeta 6-4

Probeta 6-5

Probeta 6-6

**ANEXO II**

**DATOS INDIVIDUALES DE LAS  
PROBETAS**

Medidas y masa de probetas:

SERIE 1	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Masa [g]
1-1	10,00	148,48	39,78	106,70
1-2	9,02	149,30	39,66	100,38
1-3	9,45	149,14	40,32	107,69
1-4	9,72	149,06	40,25	107,32
1-5	8,11	149,20	40,36	86,76
1-6	8,64	149,04	40,21	86,11

SERIE 2	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Masa [g]
2-1	8,86	147,41	39,88	103,00
2-2	8,83	147,38	39,62	97,60
2-3	8,62	146,91	39,13	89,30
2-4	8,02	146,24	39,18	85,50
2-5	7,83	147,82	39,60	76,90
2-6	7,59	147,94	38,96	73,40

SERIE 3	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Masa [g]
3-1	8,81	148,64	39,76	108,50
3-2	8,75	148,18	39,68	111,50
3-3	8,59	147,96	39,58	106,30
3-4	8,90	147,84	39,96	116,80
3-5	8,73	148,12	39,68	118,90
3-6	8,79	147,75	39,55	110,30

SERIE 4	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Masa [g]
4-1	9,91	147,53	39,37	109,10
4-2	9,19	147,58	39,63	112,50
4-3	9,22	147,89	39,59	106,50
4-4	8,43	146,16	39,79	98,00
4-5	9,28	147,20	39,41	104,30
4-6	9,65	148,66	40,08	114,70

SERIE 5	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Masa [g]
5-1	8,61	150,53	41,10	110,23
5-2	8,63	150,08	39,84	103,98
5-3	8,28	150,60	40,47	106,68
5-4	8,47	150,62	40,69	101,33
5-5	8,26	150,61	39,88	105,27
5-6	8,87	150,74	40,72	114,41

SERIE 6	Espesor [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Masa [g]
6-1	8,88	150,85	40,76	121,06
6-2	9,72	151,14	40,76	121,15
6-3	10,28	151,02	40,64	128,27
6-4	8,13	150,98	41,16	100,82
6-5	8,51	151,11	40,36	110,39
6-6	9,44	150,82	40,67	112,23

## **ANEXO III**

# **RESULTADOS INDIVIDUALES DEL ENSAYO A FLEXIÓN**

SERIE 1	Rtf [MPa]	Efl [MPa]
1-1	20,93	3031,54
1-2	22,56	3419,58
1-3	20,15	2695,87
1-4	-	-
1-5	37,49	6060,46
1-6	29,64	5039,00
MEDIA	26,15	4049,29

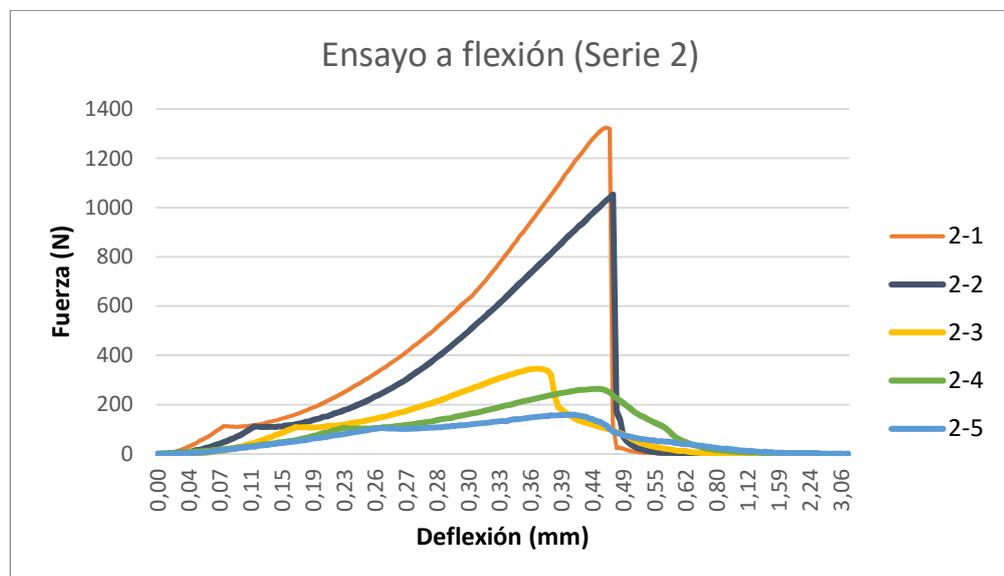
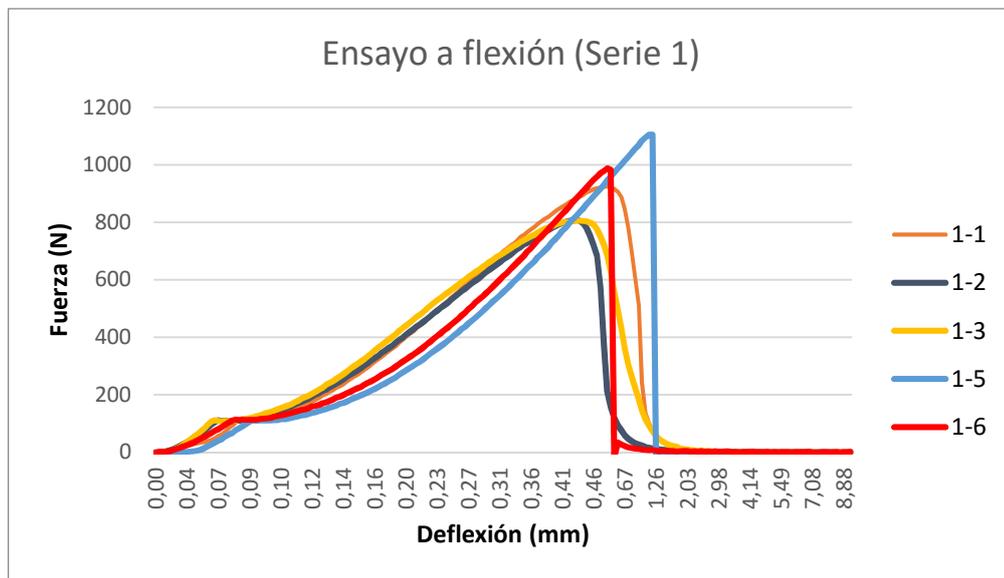
SERIE 2	Rtf [MPa]	Efl [MPa]
2-1	38,12	7435,97
2-2	30,70	5774,10
2-3	10,73	2603,45
2-4	9,43	2504,83
2-5	5,90	1431,76
2-6	-	-
MEDIA	18,97	3950,02

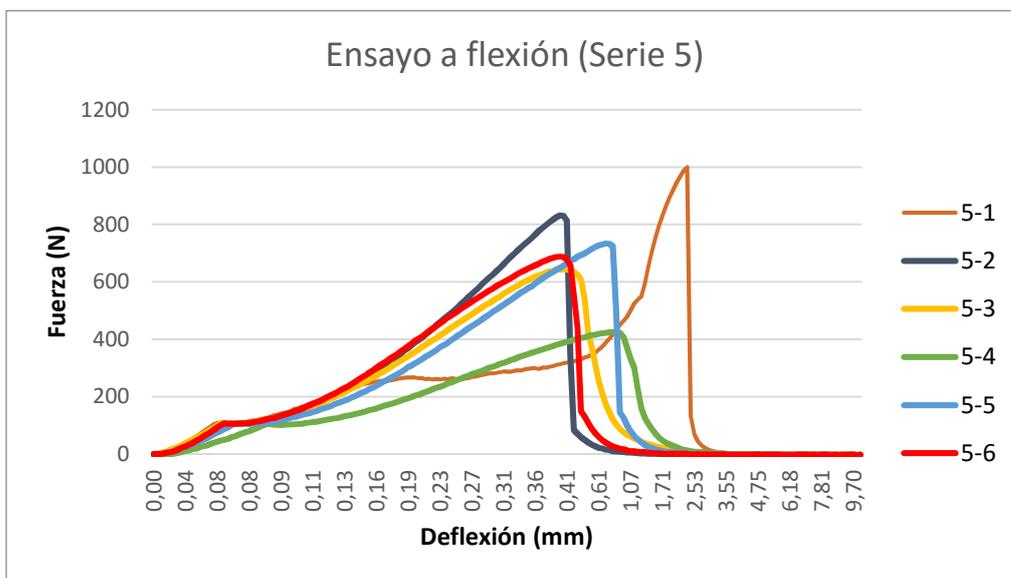
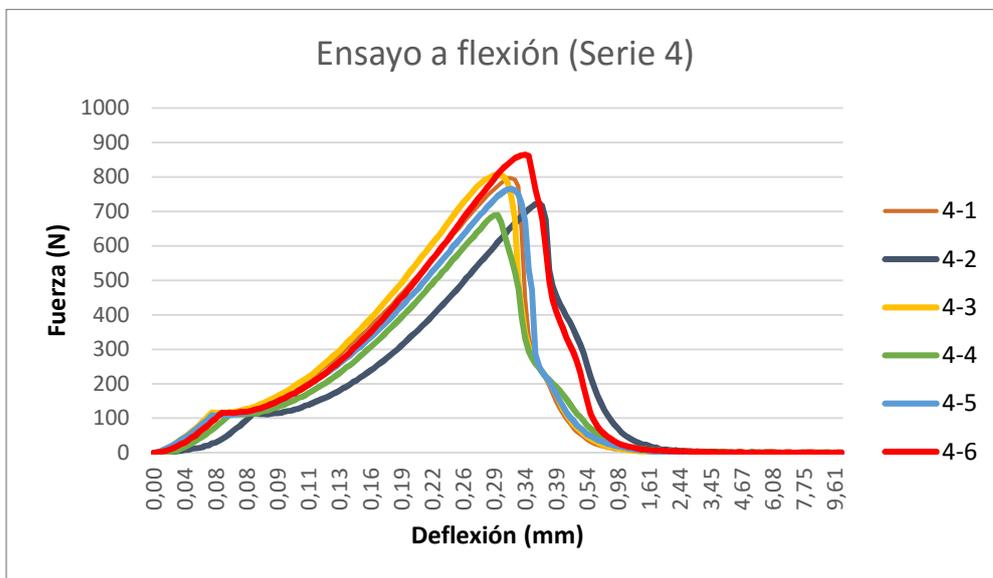
SERIE 3	Rtf [MPa]	Efl [MPa]
3-1	24,74	5198,22
3-2	27,87	6390,48
3-3	24,40	5405,22
3-4	31,68	7507,84
3-5	31,89	7137,61
3-6	23,98	4689,42
MEDIA	27,43	6054,80

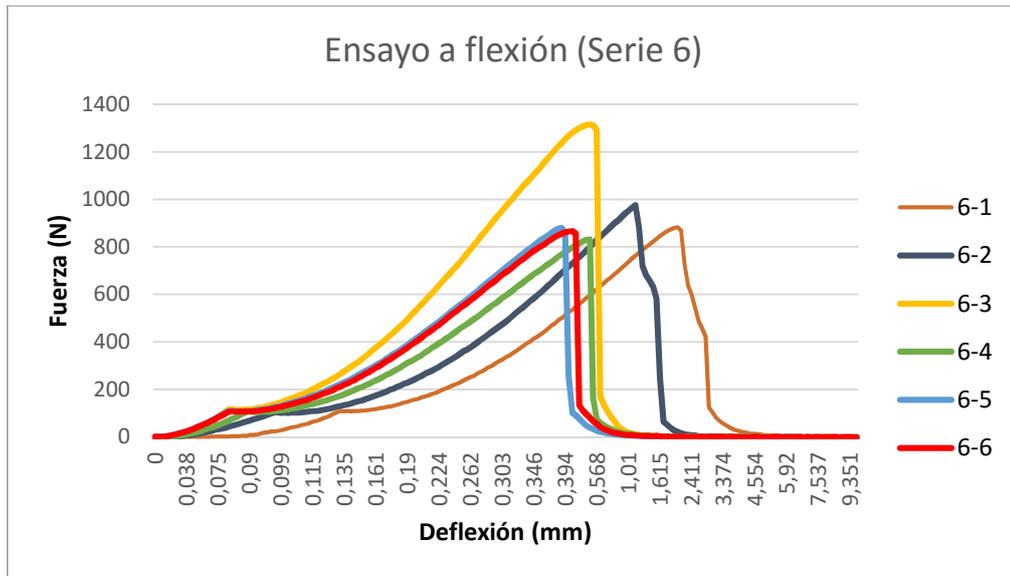
SERIE 4	Rtf [MPa]	Efl [MPa]
4-1	18,53	4336,35
4-2	19,47	5004,10
4-3	21,59	5782,76
4-4	21,96	6512,91
4-5	20,31	5046,78
4-6	20,87	4928,20
MEDIA	20,46	5268,52

SERIE 5	Rtf [MPa]	Efl [MPa]
5-1	29,55	4616,88
5-2	25,25	4929,99
5-3	20,90	3252,99
5-4	13,16	1928,82
5-5	24,30	3859,17
5-6	19,35	2541,35
MEDIA	22,09	3521,53

SERIE 6	Rtf [MPa]	Efl [MPa]
6-1	24,74	4870,03
6-2	22,79	3768,46
6-3	27,58	5332,41
6-4	27,53	5849,29
6-5	27,13	5512,23
6-6	21,54	3859,56
MEDIA	25,22	4865,33







## **ANEXO IV**

# **TABLAS DE DENSIDAD APARENTE Y ABSORCIÓN DE AGUA**

**Variaciones de masa**

Serie 1:

SERIE 1	Tiempo sumergido											
	1 hora		8 horas		24 horas		24 horas		24 horas		24 horas	
	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)										
1-1	55,6	28,09	55,75	28,2	55,87	28,31	55,86	28,31	55,93	28,33	55,98	28,34
1-2	100,43	51,06	100,7	51,34	100,91	51,42	100,96	51,45	101,07	51,53	---	---
1-3	107,98	55,12	108,21	55,2	108,43	55,27	108,49	55,31	108,63	55,35	---	---
1-4	107,41	54,9	107,62	54,78	107,83	55,02	107,93	55,08	107,98	55,13	---	---
1-5	86,95	44,16	87,22	44,07	87,42	44,16	87,49	44,19	87,59	44,3	---	---
1-6	86,33	44,17	86,47	43,93	86,68	44,28	86,75	44,31	86,79	44,32	---	---

Serie 2:

SERIE 2	Tiempo sumergido											
	1 hora		8 horas		24 horas		24 horas		24 horas		24 horas	
	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)										
2-1	103,52	51,57	103,76	51,67	104	51,73	103,99	51,75	104,09	51,79	---	---
2-2	98,78	48,95	99,25	49,39	99,6	49,51	99,62	49,53	99,92	49,64	---	---
2-3	91	44,68	91,62	45,44	92,06	45,71	91,97	45,83	92,19	45,89	---	---
2-4	87,18	43,08	87,78	43,57	88,17	43,8	87,89	43,81	88,15	43,95	---	---
2-5	79,47	38,6	80,13	39,2	80,7	39,51	80,42	39,52	80,73	39,55	---	---
2-6	76,04	36,96	76,64	37,45	77,02	37,64	77,24	37,68	77,3	37,71	---	---

24 horas		24 horas		24 horas	
m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)
---	---	---	---	---	---
99,92	49,65	99,96	49,67	---	---
92,26	45,92	92,29	45,95	---	---
88,17	43,98	88,22	44	---	---
80,75	39,54	80,76	39,56	---	---
77,48	37,75	77,45	37,76	77,52	37,78

Serie 3:

SERIE 3	Tiempo sumergido											
	1 hora		8 horas		24 horas		24 horas		24 horas		24 horas	
	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)										
3-1	109,1	60,87	109,48	61,03	109,67	61,13	109,76	61,16	109,99	61,23	---	---
3-2	112,13	62,6	112,52	62,83	112,77	62,94	112,83	63,02	113,04	63,13	---	---
3-3	106,68	59,29	106,94	60,01	107,28	60,32	107,33	60,36	107,52	60,45	---	---
3-4	117,22	65,13	117,49	65,19	117,87	65,42	117,98	65,45	118,14	65,58	---	---
3-5	119,32	67,7	119,61	68,02	119,97	68,3	120,03	68,36	120,22	68,45	---	---
3-6	110,95	61,52	111,23	61,71	111,66	61,98	111,8	62,03	112,02	62,16	---	---

24 horas		24 horas	
m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)
110,01	61,2	110,06	61,23
113,13	63,11	113,16	63,13
107,58	60,44	107,62	60,45
118,21	65,56	118,24	65,58
120,28	68,38	120,33	68,36
112,04	62,14	112,06	62,16

Serie 4:

SERIE 4	Tiempo sumergido									
	1 hora		8 horas		24 horas		24 horas		24 horas	
	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)								
4-1	51,38	27,45	51,47	27,53	51,62	27,61	51,68	27,61	51,78	27,68
4-2	113,12	60,2	113,34	60,31	113,64	60,4	113,81	60,51	113,96	60,59
4-3	107,08	57,05	107,2	56,83	107,48	56,91	107,69	57,01	107,79	57,1
4-4	98,55	52,15	98,72	51,93	99,03	52,17	99,19	52,2	99,36	52,19
4-5	104,99	55,88	105,06	56,12	105,49	56,03	105,63	56,08	105,78	56,12
4-6	115,44	61,39	115,54	61,48	116,01	61,58	116,24	61,65	116,4	61,69

24 horas		24 horas	
m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)
51,82	27,7	51,85	27,71
114,01	60,61	114,09	60,64
107,87	57,13 ---	---	---
99,41	52,22	99,46	52,26
105,79	56,1	105,86	56,12
116,42	61,72	116,48	61,76

Serie 5:

SERIE 5	Tiempo sumergido									
	1 hora		8 horas		24 horas		24 horas		24 horas	
	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)								
5-1	110,59	59,72	110,79	59,91	110,94	59,99	111,07	60,06	111,29	60,13
5-2	104,36	55,16	104,47	55,06	104,69	55,31	104,79	55,38	104,89	55,39
5-3	107,12	57,74	107,28	57,88	107,6	57,94	107,71	58,02	107,93	58,12
5-4	102,03	55,23	102,21	55,3	102,59	55,36	102,7	55,41	102,99	55,53
5-5	105,88	56,69	106,05	56,73	106,28	56,79	106,38	56,84	106,62	56,92
5-6	114,82	63,61	114,93	63,74	115,18	63,81	115,36	63,84	115,53	63,86

24 horas		24 horas		24 horas	
m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)
111,44	60,18	111,51	60,2	111,56	60,22
---	---	---	---	---	---
108	58,14	108,08	58,19	---	---
103	55,53	103,07	55,55	---	---
106,6	56,94	106,63	56,93	---	---
115,56	63,88	115,62	63,85	---	---

Serie 6:

SERIE 6	Tiempo sumergido									
	1 hora		8 horas		24 horas		24 horas		24 horas	
	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)								
6-1	121,35	66,01	121,38	67,68	121,51	66,5	121,63	66,55	121,61	66,6
6-2	121,35	65,34	121,41	65,41	121,61	65,69	121,6	65,59	121,6	65,63
6-3	128,44	71,7	128,5	68,87	128,62	68,97	128,78	69,05	128,63	69,02
6-4	101,13	55,34	101,18	53,72	101,29	53,89	101,39	53,93	101,25	53,82
6-5	110,77	59,42	110,85	59,56	110,95	59,79	111,13	59,91	111,06	59,88
6-6	112,49	60,29	112,56	60,54	112,66	60,6	112,84	60,76	112,72	60,71

Tiempo sumergido					
24 horas		24 horas		24 horas	
m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)	m <sub>a</sub> (g)	m <sub>s</sub> (g)
121,81	66,71	122	66,02	122,08	
121,81	65,82	121,96	65,89	122	
128,92	69,21	129,07	69,25	129,13	
101,49	53,94	101,6	53,96	101,76	
111,26	60,01	111,35	60,05	111,51	
113	60,68	113,06	60,69	113,22	

### Absorción de agua y densidad aparente

SERIE 1	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )
1-1	0,77	2004,99
1-2	0,69	2021,42
1-3	0,87	2016,40
1-4	0,61	2025,82
1-5	0,96	1999,39
1-6	0,79	2022,72
MEDIA	0,78	2015,12

SERIE 2	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )
2-1	1,06	1964,72
2-2	2,42	1936,12
2-3	3,35	1922,47
2-4	3,18	1928,91
2-5	5,02	1862,06
2-6	5,61	1842,61
MEDIA	3,44	1909,48

SERIE 3	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )
3-1	1,44	2216,71
3-2	1,49	2223,36
3-3	1,24	2248,19
3-4	1,23	2212,72
3-5	1,20	2282,41
3-6	1,60	2205,16
MEDIA	1,37	2231,42

SERIE 4	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )
4-1	1,19	2117,57
4-2	1,41	2099,76
4-3	1,29	2093,94
4-4	1,49	2071,33
4-5	1,50	2091,91
4-6	1,55	2091,14
MEDIA	1,40	2094,27

SERIE 5	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )
5-1	1,21	2141,95
5-2	0,88	2095,61
5-3	1,31	2133,22
5-4	1,72	2127,29
5-5	1,29	2113,07
5-6	1,06	2204,71
MEDIA	1,24	2135,97

SERIE 6	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (kg/mm <sup>3</sup> )
6-1	0,83	2154,33
6-2	0,76	2152,86
6-3	0,73	2135,95
6-4	0,96	2103,74
6-5	1,03	2141,72
6-6	0,92	2131,81
MEDIA	0,87	2136,74

## **ANEXO V**

### **TABLAS DE DUREZA KNOOP**

Probeta 1-5:

Diagonal mayor (mm)	Dureza Knoop [HK] (MPa)
0,131	406,31
0,101	683,53
0,154	294,01
0,109	586,88
0,035	5692,00
0,144	336,26
0,07	1423,00
0,119	492,39
0,141	350,72
0,087	921,22
0,139	360,89
0,134	388,32
0,127	432,31
0,13	412,59
0,065	1650,34
0,143	340,98
0,164	259,25
0,068	1507,94
0,14	355,75
0,042	3952,78
<b>MEDIA</b>	<b>1042,373</b>

Probeta 2-1:

Diagonal mayor (mm)	Dureza Knoop [HK] (MPa)
0,121	476,24
0,103	657,24
0,064	1702,32
0,126	439,20
0,107	609,02
0,122	468,47
0,106	620,57
0,093	806,19
0,114	536,53
0,039	4584,29
0,131	406,31
0,128	425,58
0,107	609,02
0,163	262,44
0,132	400,18
0,098	726,02
0,049	2904,08
0,033	6402,85
0,12	484,22
0,052	2578,66
<b>MEDIA</b>	<b>1304,97</b>

Probeta 3-5:

Diagonal mayor (mm)	Dureza Knoop [HK] (MPa)
0,111	565,92
0,13	412,59
0,122	468,47
0,157	282,88
0,169	244,13
0,205	165,92
0,156	286,52
0,166	253,04
0,166	253,04
0,238	123,10
0,194	185,27
0,132	400,18
0,184	205,95
0,162	265,69
0,179	217,62
0,109	586,88
0,112	555,86
0,07	1423,00
0,058	2072,74
0,129	419,01
<b>MEDIA</b>	<b>469,39</b>

Probeta 4-4:

Diagonal mayor (mm)	Dureza Knoop [HK] (MPa)
0,057	2146,11
0,095	772,60
0,113	546,06
0,099	711,43
0,136	376,98
0,101	683,53
0,112	555,86
0,129	419,01
0,135	382,59
0,121	476,24
0,077	1176,03
0,102	670,19
0,123	460,88
0,084	988,19
0,127	432,31
0,112	555,86
0,176	225,10
0,066	1600,71
0,145	331,64
0,116	518,19
<b>MEDIA</b>	<b>701,48</b>

Probeta 5-1:

Diagonal mayor (mm)	Dureza Knoop [HK] (MPa)
0,143	340,98
0,194	185,27
0,096	756,59
0,154	294,01
0,102	670,19
0,054	2391,19
0,192	189,15
0,105	632,44
0,97	7,41
0,159	275,81
0,156	286,52
0,065	1650,34
0,122	468,47
0,178	220,07
0,13	412,59
0,152	301,80
0,12	484,22
0,132	400,18
0,11	576,26
0,14	355,75
<b>MEDIA</b>	<b>544,96</b>

Probeta 6-3:

Diagonal mayor (mm)	Dureza Knoop [HK] (MPa)
0,18	215,21
0,133	394,18
0,036	5380,17
0,069	1464,55
0,179	217,62
0,167	250,02
0,141	350,72
0,21	158,11
0,14	355,75
0,21	158,11
0,14	355,75
0,184	205,95
0,143	340,98
0,079	1117,24
0,142	345,80
0,152	301,80
0,099	711,43
0,132	400,18
0,127	432,31
0,138	366,14
<b>MEDIA</b>	<b>676,10</b>

**ANEXO VI**

**TABLAS COMPARATIVAS DE CHOQUE  
TÉRMICO**

SERIE 3	$m_0$ (g)	$m_f$ (g)	$R_f$ (MPa)	$R_{sf}$ (MPa)	$\Delta m$ (%)	$\Delta R_f$ (%)
3-1	53,04	52,77	24,74	20,55	0,51	16,94
3-2	55,39	55,10	27,87	19,48	0,53	30,10
3-3	52,73	52,48	24,40	15,25	0,47	37,50
3-4	61,41	61,06	31,68	22,78	0,58	28,09
3-5	61,31	61,05	31,89	20,10	0,43	36,97
3-6	63,87	63,59	23,98	16,34	0,45	31,86
MEDIA					0,49	30,24

SERIE 6	$m_0$ (g)	$m_f$ (g)	$R_f$ (MPa)	$R_{sf}$ (MPa)	$\Delta m$ (%)	$\Delta R_f$ (%)
6-1	58,89	58,59	24,74	20,47	0,50	17,26
6-2	60,21	59,96	22,79	22,61	0,42	0,79
6-3	66,03	65,77	27,58	27,80	0,40	-0,80
6-4	51,66	51,41	27,53	26,10	0,47	5,19
6-5	54,40	54,17	27,13	25,15	0,42	7,30
6-6	60,78	60,53	21,54	20,77	0,41	3,57
MEDIA					0,44	5,55

*Nota:* El ensayo se realizó con las mitades ya ensayadas a flexión de cada serie; La distancia entre los rodillos de apoyo se tomó como 30 mm.

**ANEXO VII**

**TABLAS DE RESISTIVIDAD  
ELÉCTRICA**

Probeta	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Resistividad (ohm·m)
1-5	$3,80 \cdot 10^{-6}$	20	$6,39 \cdot 10^4$
	$7,70 \cdot 10^{-6}$	40	$6,31 \cdot 10^4$
	$1,43 \cdot 10^{-6}$	60	$5,10 \cdot 10^4$
2-1	$9,50 \cdot 10^{-6}$	20	$2,34 \cdot 10^4$
	$1,34 \cdot 10^{-6}$	40	$3,32 \cdot 10^4$
	$1,52 \cdot 10^{-5}$	60	$4,39 \cdot 10^4$
3-5	$1,49 \cdot 10^{-5}$	20	$1,51 \cdot 10^4$
	$2,02 \cdot 10^{-5}$	40	$2,23 \cdot 10^4$
	$2,36 \cdot 10^{-5}$	60	$2,87 \cdot 10^4$
4-4	$1,06 \cdot 10^{-5}$	20	$2,20 \cdot 10^4$
	$1,41 \cdot 10^{-5}$	40	$3,31 \cdot 10^4$
	$2,01 \cdot 10^{-5}$	60	$3,49 \cdot 10^4$
5-1	$4,30 \cdot 10^{-6}$	20	$5,32 \cdot 10^4$
	$7,70 \cdot 10^{-6}$	40	$5,94 \cdot 10^4$
	$1,23 \cdot 10^{-5}$	60	$5,58 \cdot 10^4$
6-3	$5,00 \cdot 10^{-6}$	20	$3,83 \cdot 10^4$
	$1,07 \cdot 10^{-5}$	40	$3,58 \cdot 10^4$
	$1,62 \cdot 10^{-5}$	60	$3,55 \cdot 10^4$

Probeta	Espesor (m)
1-5	$8,11 \cdot 10^{-3}$
2-1	$8,86 \cdot 10^{-3}$
3-5	$8,73 \cdot 10^{-3}$
4-4	$8,43 \cdot 10^{-3}$
5-1	$8,61 \cdot 10^{-3}$
6-3	$1,03 \cdot 10^{-2}$

Superficie de electrodos:  $9,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$