



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Trabajo Fin de Grado

FABRICACIÓN DE PIEDRA ARTIFICIAL A PARTIR DE RESIDUOS

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
Universidad de La Laguna

Alumna: María de León González

Tutora: María Hernández Molina

Septiembre, 2015

AGRADECIMIENTOS

Dar las gracias a mi tutora, y a todo el Área de Materiales del Dpto. de Ingeniería Industrial de la ULL, por la ayuda prestada y su continuo interés y apoyo. Siempre les estaré muy agradecida.

Al proyecto de investigación “Diseño y caracterización de ecomateriales fabricados con residuos de vidrio”, concretamente a José Antonio Valido por su implicación y ayuda.

A mi madre y a mi padre, por enseñarme que todo lo que me proponga lo puedo conseguir. A mis tíos por tratarme como una hija y haberme permitido llegar donde estoy. Y al resto de mi familia, muchas gracias.

A mi segunda familia a la que yo escogí, por hacer de este el mejor camino de mi vida. Gracias por formar parte de esto.

FINANCIACIÓN

Este Trabajo Fin de Grado ha sido llevado a cabo gracias a la financiación de la Fundación Caja Canarias, del Proyecto de Investigación "Diseño y caracterización de ecomateriales de construcción fabricados con residuos de vidrio" (RESI04).

Índice de Contenidos

1.	Objeto y alcance	15
1.1	Español	15
1.2	English.....	15
2.	Introducción	17
2.1	Piedra aglomerada	18
2.2	Aglomerante	19
2.2.1	Resina poliéster	20
2.2.2	Resina epóxica.....	21
2.2.3	Propiedades de las resinas.....	22
2.3	Agregados, vidrio reciclado	22
2.3.1	Propiedades del vidrio.....	24
3.	Antecedentes	25
3.1	Productos	25
3.2	Procesos de fabricación	26
4.	Metodología de fabricación	29
4.1	Moldes.....	31
4.1.1	Molde 1	31
4.1.2	Molde 2	32
4.1.3	Molde 3	33
4.2	Materias primas	34
4.2.1	Resinas	34

4.2.2	Colorante	36
4.2.3	Procesamiento del vidrio	37
4.3	Elaboración de probetas	42
4.3.1	Probetas Iniciales	43
4.3.2	Probetas Intermedias	46
4.3.3	Probetas Finales.....	50
4.3.4	Preparación de las probetas.....	51
4.3.5	Análisis de fallos en los moldes.....	57
4.3.5.1	Análisis de fallos Molde 1	57
4.3.5.2	Análisis de fallos Probetas Intermedias.....	59
4.3.5.3	Análisis de fallos Molde 3.....	60
4.3.6	Preparación para ensayo.....	63
4.3.7	Protección individual.....	64
5.	Ensayos.....	64
5.1	Resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2).....	64
5.2	Densidad aparente y absorción de agua (UNE-EN 14617-1)	67
5.3	Dureza Knoop (UNE-EN 14205).....	69
5.4	Microscopía digital	72
6.	Resultados y discusión.....	73
6.1	Resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2).....	73
6.1.1	Probetas Intermedias	73
6.1.2	Probetas finales.....	77

6.2	Densidad aparente y absorción de agua (UNE-EN 14617-1).....	79
6.3	Microdureza Knoop (UNE-EN 14205)	79
6.4	Microscopía digital.....	80
7.	Resumen de resultados	82
8.	Conclusiones	83
8.1	Español	83
8.2	English.....	84
9.	Bibliografía	85
	ANEXO I. Fotográfico	89
I.1.	Preparación para ensayos.....	89
I.2.	Ensayo a flexión	97
I.3.	Ensayo de densidad aparente y absorción de agua.....	100
I.4.	Ensayo de dureza Knoop	100
	ANEXO II. Graficas ensayos a flexión.	101
	ANEXO III. Resultados por muestra	109
III.1.	Ensayo resistencia a flexión	109
III. 2.	Ensayo de densidad aparente y absorción de agua	115
III.3.	Ensayo de dureza Knoop	117
	ANEXO IV. Valores comerciales.....	119

Índice de Figuras

Figura I. Muestras de piedra natural [12].	19
Figura II. Muestras de piedra artificial aglomerada [12].	19
Figura III. Vidrio de envase blanco, verde y marrón.	23
Figura IV. Diagrama proceso de fabricación industrial piedra aglomerada.	28
Figura V. Diagrama procesos de fabricación para este estudio.	29
Figura VI. Molde 1.	32
Figura VII. Molde 2 unido y separado.	32
Figura VIII. Molde 3.	33
Figura IX. Recubrimiento superior, Molde 3.	33
Figura X. Base Molde 3.	34
Figura XI. Placas de apoyo Molde 3.	34
Figura XII. Resina epóxica y catalizador.	35
Figura XIII. Resina de Poliéster y catalizador.	36
Figura XIV. Pasta pigmentada para resinas.	36
Figura XV. Vidrio secado al aire.	37
Figura XVI. Trituradora de mandíbulas.	38
Figura XVII. Vidrio a la salida de la trituradora de mandíbulas.	38
Figura XVIII. Trituradora de rodillos.	39
Figura XIX. Vidrio a la salida de la trituradora de rodillos.	39

Figura XX. Disposición de tamices.	40
Figura XXI. Almacenamiento del vidrio de 250 μm	41
Figura XXII. Probetas 0.7, 0.5 y 0.1.	46
Figura XXIII. Probetas Intermedias, Series 3-10.	50
Figura XXIV. Probetas Finales, Series I, B y V.	51
Figura XXV. Pesada del grano de 500 μm , Serie 2.	53
Figura XXVI. Pesada del grano de 125 μm , Serie 2.	53
Figura XXVII. Pesada del grano <63 μm , Serie 2.	54
Figura XXVIII. Pesada de la resina epóxica y el catalizador, Serie 2.	54
Figura XXIX. Vertido de materias primas en recipiente para amasada.	55
Figura XXX. Proceso de amasado con mezclador.	56
Figura XXXI. Coloración de la amasada.	56
Figura XXXII. Desmoldado Molde 1.	58
Figura XXXIII. Aspecto de las probetas 0.1-0.4.	59
Figura XXXIV. Base probetas Serie 8.	59
Figura XXXV. Base probetas Serie 9.	60
Figura XXXVI. Placa de apoyo Molde 3, filtración de la resina.	61
Figura XXXVII. Base probetas	61
Figura XXXVIII. Placas de apoyo en acetona.	61
Figura XXXIX. Placa de apoyo y tela.	62
Figura XL. Telas empapadas en alcohol polivinílico en Molde 3.	62

Figura XLI. Lijadora de banda Bosch PSB 75 A.....	63
Figura XLII. Papel de lija Dexter de 80 y 120.	63
Figura XLIII. Disposición de la probeta sobre los rodillos de carga [19].	65
Figura XLIV. Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph.	66
Figura XLV. Probetas sumergidas.....	67
Figura XLVI. Pesada hidrostática de las probetas.....	68
Figura XLVII. Balanza Pioneer OHAUS.	69
Figura XLVIII. Observación al microscopio, indentación dureza Knoop.	70
Figura XLIX. Microdurómetro Struers Duramin -50.	70
Figura L. Struers Labapol-5.....	71
Figura LI. Struers SiC-Paper 800.	71
Figura LII. Paños para pulido.	71
Figura LIII. Microscopio óptico digital Dino-Lite.	72
Figura LIV. Grafica fuerza VS. Deflexión, Serie 2.	74
Figura LV. Microscopía digital, Serie Blanco.	80
Figura LVI. Microscopía digital, Serie Verde.	81

Índice de Tablas

Tabla I. Comparación propiedades resina de poliéster y resina epóxica [9].	22
Tabla II. Propiedades del vidrio [6].....	24
Tabla III. Inventariado y estimación de vidrio.....	41
Tabla IV. Designación probetas iniciales.	42
Tabla V. Designación de probetas intermedias.....	43
Tabla VI. Designación de probetas finales.....	43
Tabla VII. Proporciones iniciales.....	44
Tabla VIII. Cantidades probetas 0.2, 0.3 y 0.4.....	44
Tabla IX. Cantidades probetas 0.5 y 0.6.....	45
Tabla X. Cantidades probetas 0.7 y 0.8.....	45
Tabla XI. Proporciones Probetas Intermedias, Serie 1 y 2.	47
Tabla XII Proporciones Probetas intermedias, series 2-10.....	48
Tabla XIII. Justificación de las combinaciones empleadas.	49
Tabla XIV. Pesos probetas Serie 0.....	58
Tabla XV. Resultados por muestra, ensayo a flexión Serie 2.	74
Tabla XVI. Resultados a flexión, elección de resina.	75
Tabla XVII. Resultados a flexión, importancia granulométrica.....	76
Tabla XVIII. Resultados a flexión serie Transparente, comparación Serie 2. ...	78

Tabla XIX. Resultados a flexión serie Blanco, comparación Serie 6.	78
Tabla XX. Resultados a flexión serie Verde, comparación Serie 8.	78
Tabla XXI. Resultados densidad y absorción de agua.	79
Tabla XXII. Resultados dureza Knoop.	80
Tabla XXIII. Resumen de resultados, piedra aglomerada.	82

1. Objeto y alcance

1.1 Español

La finalidad de este proyecto es determinar la viabilidad de fabricar piedra artificial a partir de residuos de vidrio de envases, partiendo de estudios previos realizados.

Su desarrollo implica la selección y procesado de las materias primas que compondrán dicha piedra, así como la fabricación de la misma teniendo en cuenta las posibilidades de acabado. Se estudiarán las propiedades que esta posee, según su composición y método de elaboración, que sufrirá variaciones a lo largo del estudio.

Las propiedades se determinarán realizando diferentes ensayos, para así obtener los valores de resistencia a flexión, densidad, absorción de agua y dureza. Que permiten analizar dicha piedra, y fijar el aglomerante apropiado, así como la influencia del tamaño del grano en las propiedades de la piedra. Según los resultados obtenidos, determinamos la viabilidad de este tipo de fabricación, comparando dichos valores con los ya conocidos de piedra natural y piedra artificial aglomerada, que se distribuye actualmente en el mercado como encimeras de baños y cocinas.

En base a los procesos de fabricación empleados actualmente en la industria se buscarán variaciones en la fabricación, y se propondrán para estudios posteriores, aquellas modificaciones que por el alcance del proyecto no se han podido desarrollar.

1.2 English

This project's purpose is to determine the artificial stones manufacturing viability, since glass wastes, using previous studies.

Its developing means the selection and processing of the stone's raw materials, as well as them fabrication, considering the possibility of finishing. The properties it

owns will be studied according to their composition and method of production, which will vary depending on the course of the study.

Properties will be determined by conducting various assays, to obtain the values of bending, strength, density, water absorption and hardness. These values allow us to analyze each stone and set the binder appropriate quantity, as well as size of the grain influences into the stones properties. According to the obtained results, we determine the viability of this type of construction, comparing these values with the known agglomerated natural and artificial stone, which is currently available in the market like granite bathrooms and kitchens.

Basing on manufacturing processes currently used in the industry, we will search variations and will be proposed for further studies; those modifications by the scope of the project have not been able to develop.

2. Introducción

Estudios previos a la realización del presente proyecto, demuestran que la utilización de residuos para la fabricación de materiales de construcción es viable, obteniéndose materiales resistentes, duraderos y con buenas propiedades mecánicas. En la mayoría de estos proyectos se ha empleado como aglomerante cemento Portland ordinario, y diferentes residuos como sustitutos de los áridos. Así por ejemplo, se ha empleado el polvo de piedra caliza, para la fabricación de ladrillos de mampostería [5]; lodos de piedra y sedimentos de residuos, para la fabricación de piedra artificial [3], en ambos casos son residuos procedentes del procesado industrial de áridos. Estos estudios demuestran que existe un sustituto viable para los agregados de piedra natural, y una alternativa ecológica para la gestión de residuos.

Los materiales de construcción fabricados a partir de residuos, los llamados ecomateriales, poseen las mismas propiedades físico-químicas que los fabricados con áridos naturales. Por lo tanto se plantea la fabricación de materiales de construcción a partir de un residuo en concreto: el vidrio. Éste posee la misma composición química y propiedades similares a la arena natural, de modo que es buen candidato a sustituir los áridos en la fabricación de materiales de construcción.

Existen muchos estudios que incorporan el vidrio entre sus materias primas. Concretamente acerca de la preparación asfaltos sustituyendo los áridos de arenas naturales por áridos de vidrio reciclado [4], así como morteros con sustitución total de los áridos naturales por arena de vidrio de envase reciclado [1], y hormigones con sustitución parcial [8]. Evidenciando que el vidrio es un sustituto válido para los áridos naturales, por lo que será el elemento principal del estudio.

Aunque hasta ahora hay pocos estudios sobre la fabricación de piedra artificial a partir de residuos. Podemos destacar uno, en el cual se fabrican losas de piedra artificial empleando resinas poliméricas como aglomerante, con fragmentos de vidrio y residuos de piedra natural [7]. En este trabajo sustituyen parcialmente el árido natural con un único tamaño de vidrio y diferente granulometrías para los áridos naturales. Además de incorporar vibración, vacío y presión en sus conformados. Consiguiendo

resultados superiores a los de las piedras naturales comercializadas. Lo que nos lleva a analizar la posibilidad de una sustitución total de los áridos naturales por arenas de vidrio reciclado.

Sabemos que uno de los productos que actualmente están en auge el mercado, es la piedra artificial aglomerada empleada para encimeras de baños y cocinas, que emplean aglomerantes poliméricos y agregados naturales, por lo que centraremos el estudio en este tipo de productos, proponiendo la sustitución total de los componentes de piedra natural por vidrio reciclado.

2.1 Piedra aglomerada

Según la norma UNE-EN 14618:2011 [17], se define como piedra aglomerada a los productos manufacturados en proceso industrial a partir de una mezcla de agregados, aditivos y el ligante o aglomerante. El aglomerante puede ser resina, cemento hidráulico, o una mezcla de ambos.

Atendiendo a dicha norma, se puede clasificar la piedra aglomerada dependiendo del aglomerante empleado, puesto que en cada caso se tendrán unas características físico-químicas distintas. Existe otra forma de clasificar dichos productos, según la naturaleza del mineral de la piedra utilizada, diferenciando entre carbonatos, silíceos y todas las posibles mezclas de ambos. No existe una normativa reguladora que especifique las características concretas que debe cumplir la piedra aglomerada, aunque si se regula la metodología de ensayos para caracterizarla, mediante el paquete de normas UNE-EN 14617.

Bajo el término *Piedra Aglomerada* se engloban los elementos arquitectónicos complementarios a los productos de recubrimiento, y que se obtienen mediante moldeo. Inicialmente se fabrican en forma de bloques o losas, que pueden ser cortados para transformarse en placas, baldosas, encimeras y elementos similares. Generalmente en la industria se le suele aplicar a estos productos tratamientos químicos posteriores, para obtener mejores condiciones de acabado.

La piedra artificial aglomerada con resinas ha tenido una buena acogida comercial, especialmente enfocada a su utilización en encimeras para baños y cocinas. El atractivo de estos productos se debe al bajo coste de fabricación y la capacidad de mecanizado [12]. Destacando que las prestaciones mecánicas que estos ofrecen, así como la facilidad de corte compiten directamente con las piedras naturales y cerámicos. Además permite aportar una gran gama de colores, texturas y acabados, haciéndolo muy llamativo en el mercado.

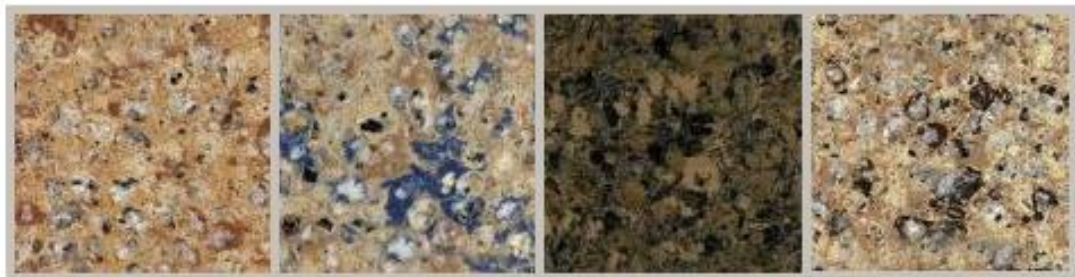


Figura I. Muestras de piedra natural [12].

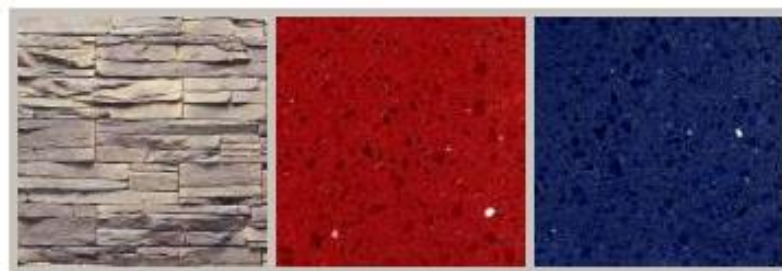


Figura II. Muestras de piedra artificial aglomerada [12].

2.2 Aglomerante

Por definición, los aglomerantes son aquellos materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y aportar cohesión. En el caso de la piedra aglomerada la norma UNE-EN 14618 [17] contempla dos tipos de aglomerantes: el cemento hidráulico y las resinas poliméricas, en las que se centrará este estudio.

Al fabricar piedra aglomerada, estamos generando un material compuesto. Pues debemos tener en cuenta que los materiales compuestos, se obtienen al unir dos o

más materiales con el fin de conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener de los materiales originales. El aglomerante no solo se encarga de la unión de los agregados, sino que además aporta a la piedra sus propiedades mecánicas. Por tanto, podemos adelantar que determinados parámetros mecánicos, dependerá en gran medida de la cantidad y tipo de resina, tal y como justificaremos posteriormente.

Para nuestro estudio hemos usado dos tipos de resinas poliméricas como aglomerante: la resina poliéster y la resina epoxi. Ambas resinas son comerciales, y presentan facilidad en su manipulación. A partir de los primeros resultados experimentales podemos decidir cuál de ellas es la mejor opción para la fabricación de la piedra aglomerada.

2.2.1 Resina poliéster

Una Resina de poliéster es un polímero termoestable¹ que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o "endurecedor". Las posibilidades de aplicación de las resinas dependen en gran medida de los catalizadores o endurecedores que intervienen en el proceso de curado. Su obtención industrial da lugar a un producto sólido, que debe ser disuelto para obtener la fluidez necesaria para su manipulación. Por lo que se suministra disuelta en estireno, que reacciona químicamente con el catalizador y el endurecedor.

Las resinas de poliéster son las más usadas, y existen diferentes tipos. Están diseñadas para facilitar el trabajo y para lograr en los productos fabricados, la máxima calidad y duración. Cambiando una o varias materias primas en el reactor, se obtienen diferentes tipos de poliéster: Tereftálico, ortoftálico, isoftálico, bisfenólico, vinilester y dicitopentadieno. Que permiten obtener cualidades en los productos como alta resistencia al fuego, alta resistencia a los rayos UV y a la humedad, con mayor o menor resistencia química, o resistencia al impacto y a las altas temperaturas.

¹ Las resinas termoestables son aquellas que bajo la influencia del calor, de la luz, o de agentes químicos y fotoquímicos, cambian irreversiblemente, pasando de ser un material fusible y soluble, a un material infusible e insoluble [16].

Los productos realizados con resinas de poliéster tienen en común las siguientes propiedades:

- Baja viscosidad.
- Tiempo de curado rápido.
- Alta contracción durante el curado.
- Curado tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas.
- Buena resistencia eléctrica.
- Buena relación calidad/precio.
- Buenas propiedades mecánicas [16].

2.2.2 Resina epóxica

Al igual que las resinas de poliéster, las resinas epóxicas también son termoestables. Aunque son más caras que las resinas de poliéster tienen mejores propiedades mecánicas que las anteriores. Su uso va desde en la construcción de moldes, como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otras ayudas a la producción industrial. Los resultados son más baratos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, etc.

Los compuestos de resinas epóxicas han tenido amplia aceptación y su uso se ha extendido a las actividades donde se requiere un polímero de mucha resistencia mecánica. Son materiales termofraguables que se vuelven duros bajo la acción de agentes acelerantes.

Las características generales de las resinas epóxica se pueden resumir en:

- Mínima contracción durante el proceso de curado.
- Adhesividad: Por su estructura química rica en grupos polares hidroxilos y éteres, las resinas epóxicas son excelentes adhesivos, sin necesidad de tiempos de exposición largos ni de grandes presiones.

- Excelentes propiedades mecánicas: Superior a las de cualquier otro recubrimiento. Su bajo índice de contracción disminuye la posibilidad de tensiones.
- Alto poder aislante eléctrico.
- Gran resistencia química, que vendrá influenciada por el agente de curado [16].

2.2.3 Propiedades de las resinas

Las resinas por sí mismas no presentan ninguna propiedad técnica útil hasta que son endurecidas. De forma orientativa mostraremos los valores característicos de las dos resinas usadas en este estudio:

PROPIEDADES	POLIÉSTER	EPÓXICA
Dureza [HV]	9,9-21,5	10,8-21,5
Resistencia a tracción [MPa]	40-90	50-130
Resistencia a flexión [MPa]	60-160	125
Módulo de flexión [MPa]	10,6-21,2	5,3-53
Densidad [g/cm ³]	1,10-1,46	1,2-1,3

Tabla I. Comparación propiedades resina de poliéster y resina epóxica [9].

Como podemos observar en la Tabla I, y como ya habíamos dicho anteriormente la resina epoxi en general presenta mejores propiedades mecánicas que la de poliéster.

2.3 Agregados, vidrio reciclado

En este estudio se ha buscado sustituir los áridos y minerales de origen natural, que se usan actualmente como agregados en la fabricación de piedra aglomerada,

por un material reciclado. Debe aportar unas buenas propiedades mecánicas, tales como dureza y resistencia, necesarias en este tipo de productos. Además se ha tenido en cuenta factores como la posibilidad de coloración, y las condiciones de reciclado. Partiendo de estudios previos realizados [4,7], se considera que el vidrio reciclado de envases puede ser un sustituto viable.

El vidrio constituido mayoritariamente por sílice es incoloro, aunque pueden colorearse por la acción de impurezas en las materias primas o por adiciones intencionadas. Aunque estos colorantes tienen poca influencia en las propiedades físicas del vidrio, a veces para obtener un color particular se deben modificar su composición.

Los principales colores del vidrio de envases, que se encuentran generalmente en el mercado son; el blanco incoloro, el marrón que es el ámbar y el verde denominado esmeralda.



Figura III. Vidrio de envase blanco, verde y marrón.

El vidrio para envases es el único que en la actualidad se recicla en grandes cantidades y más del 42 % de este vidrio procede del doméstico, siendo el sector principal de producción de vidrio recuperable.

Estos residuos son reciclables en su totalidad, a partir de un envase se puede fabricar uno nuevo sin perder sus propiedades y sin generar ningún residuo o producto secundario en el proceso de reciclado. Lo que es positivo para este proyecto, puesto

que se garantiza que el vidrio que se ha utilizado tendrá siempre características similares.

2.3.1 Propiedades del vidrio

La mayor parte de los vidrios comerciales están basados en el sílice (SiO_2), que abarca el 70% de la composición total. Además se agrega sosa (Na_2O) en un 18%, que es un modificador que permite reducir el punto de fusión, y un 10% de calcita (CaO) para reducir la solubilidad del vidrio en agua. Igualmente se pueden incorporar otras sustancias como plomo, boro y óxidos metálicos en un 2%, que modifican las propiedades del vidrio así como su aspecto [2].

El vidrio es un silicato que funde a 1.200°C , con una elevada dureza y fragilidad. Se considera un buen aislante térmico, acústico y eléctrico. Se muestra a continuación los diferentes parámetros mecánicos que lo caracterizan:

PROPIEDADES	VALORES
Dureza [HV]	439-484
Resistencia a tracción [MPa]	30-35
Módulo de elasticidad [kg/m^2]	4500-10000
Coefficiente de dilatación [Ksi]	2,10-6 (producto corriente) 18,10-6 (vidrios ricos en sílice y sosa)
Conductividad térmica [cal/m^2]	0.0011-0.0025

Tabla II. Propiedades del vidrio [6].

3. Antecedentes

Se han analizado los estudios que anteceden a este proyecto, y las empresas del sector que se dedican a la producción industrial de piedra aglomerada, para tomar referencias de los productos y métodos de producción que llevan a cabo. Lo que permitió determinar las condiciones iniciales de fabricación, y encontrar mejoras en el proceso de conformado de nuestra piedra.

Los estudios previos demuestran que el vidrio reciclado es un buen sustituto para los áridos de piedra natural [1,7], que actualmente conforman la piedra aglomerada. Aunque en la mayoría de los estudio no se sustituye por completo el árido natural, sino que se sustituye parte de su composición. Además en algunos casos, se ha empleado en el conformado compactación, vaciado y vibración, concluyendo que bajo diferentes condiciones los productos adquieren mejores propiedades mecánicas.

A nivel industrial los referentes principales han sido Silestone Cosentino y BretonStone, siendo líderes del mercado en la fabricación de este tipo de productos. Se analizará a continuación los productos que fabrican, así como el proceso de producción que llevan a cabo.

3.1 Productos

Los productos que se obtienen a nivel industrial utilizan aglomerantes y cargas minerales, así como aditivos y colorantes. A rasgos generales, estos son los elementos principales que componen este tipo de productos, aunque varían según la marca productora.

No hay disponibles datos concretos a cerca de las proporciones y cantidades de los elementos que se producen, pero podemos tratar a rasgos generales cada una de estas materias primas:

- Agregados: Los agregados o minerales son de origen natural, con diferentes granulometrías. Trabajan con sílices y cuarzo, y que estos son prácticamente el 90% de la composición total del producto. La naturaleza, las dimensiones

y la escala granulométrica de los agregados, se eligen en función de los aspectos estéticos y en base a las características físicas mecánicas que se desean obtener. Lo que lleva a considerar, si la granulometría de los agregados es determinante en las propiedades mecánicas del producto final.

- Aglutinante y aditivos: El aglutinante que se usa, es resina poliéster. Los aditivos son componentes que se añaden en pequeñas cantidades a las pastas para obtener determinados resultados.
- Colorantes: Las pastas se pueden colorear añadiendo pigmentos. Los colorantes junto con las dimensiones de los agregados, son de gran importancia para ofrecer al cliente una gran variedad cromática y estética [13].

3.2 Procesos de fabricación

Los procesos de fabricación a nivel industrial de piedra aglomerada, pueden variar dependiendo de muchos factores, como puede ser la calidad de las materias primas, los procesos de conformado, los acabados que se llevan a cabo, etc. A continuación se describirá un proceso básico de producción, para nombrar y definir las etapas importantes [15].

- Recepción de materias primas: El proceso comienza con la recepción de las materias primas, áridos de origen natural, resinas y aditivos.
- Almacenamiento: El almacenamiento de las partículas se realiza herméticamente para evitar la contaminación por adición de impurezas.
- Control de calidad: Antes de proceder a la mezcla de las materias primas, se realiza un control de calidad de las mismas. Para garantizar las condiciones de resistencia mecánica, pureza y granulometría. De esta forma se garantiza cumplir con los estándares de calidad estipulados por la empresa.
- Mezcla: Una vez aceptados los controles de calidad, se procede a mezclar las materias primas y obtener la masa. Que estará compuesta de los áridos, resinas y aditivos. Además del pigmento para aportar el color deseado, y la protección anti bacterias, uno de los puntos fuertes de este tipo de producciones.

- Prensa: La masa obtenida pasa por una prensa en la que una serie de rodillos le aportan una determinada presión. Durante el paso por la prensa, la masa está sujeta a un control continuo de pesos, para garantizar la uniformidad y buena distribución de la mezcla.
- Aspiración de vacío y vibración: Tras el paso por la prensa, la masa sufre aspiración de vacío y vibración de forma simultánea, para conseguir una compactación y eliminar bolsas de aire y burbujas.
- Curado: El curado de la masa consta de dos etapas, una fase inicial de horneado durante 30 minutos a 100°C, para agilizar el curado de la pieza. Posteriormente se deja enfriar durante 24 horas.
- Acabado: Puesto que la pieza una vez curada no es del todo uniforme, se procede a un calibrado de la misma. Y además con el fin de obtener las condiciones estándar de brillo, se realiza un proceso de pulido, usando discos y fresas.
- Almacenamiento: Para proceder a su almacenamiento se adaptan las medidas a las solicitadas por el cliente.
- Control de calidad y embalaje: Por último se realiza un control de calidad final, para asegurar las características solicitadas por el cliente y se procede al embalaje de la misma para ser distribuida.

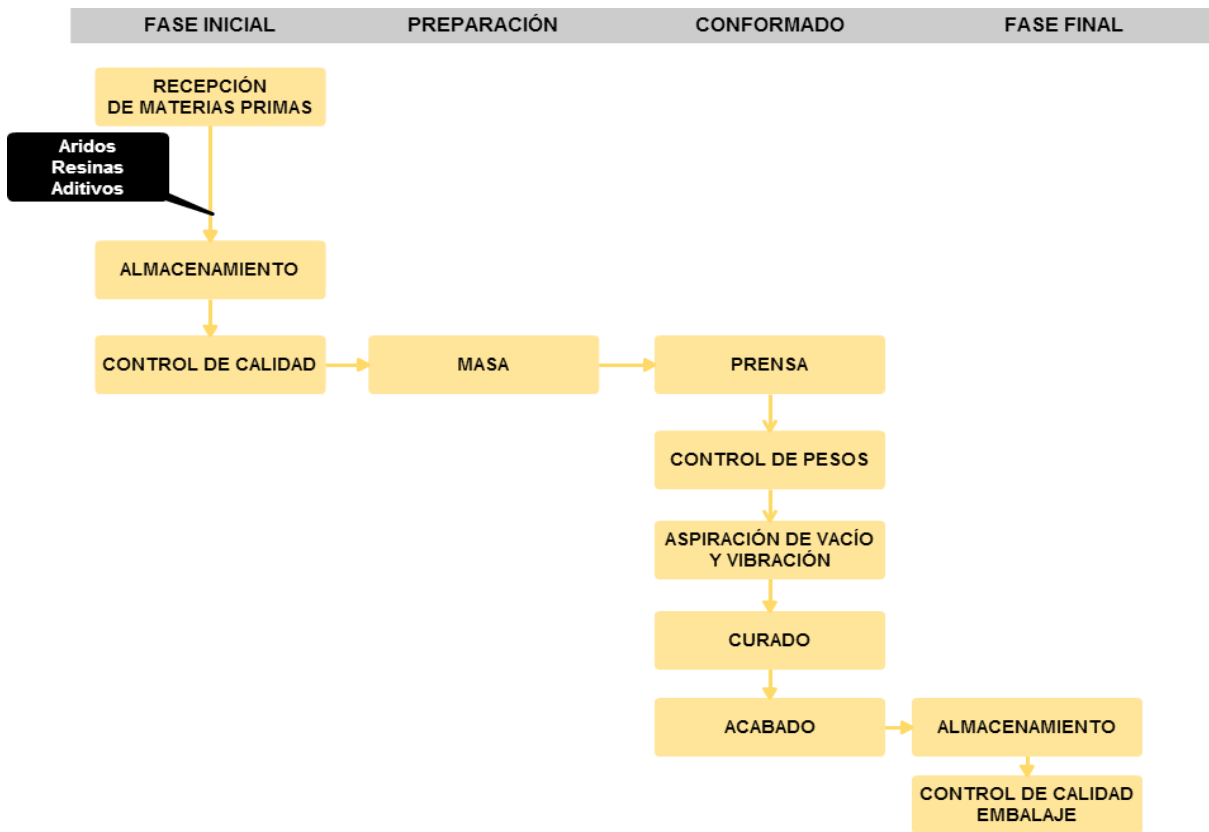


Figura IV. Diagrama proceso de fabricación industrial piedra aglomerada.

No podemos comparar una producción industrial con nuestra preparación a menor escala, ya que los medios y la calidad de los procesos de ambos distan unos de otros. Pero si podemos, mediante el estudio de los procesos de fabricación a nivel industrial, enfocar nuestros métodos de fabricación y buscar mejoras.

4. Metodología de fabricación

Una vez conocidos los aspectos principales de la producción industrial de piedra aglomerada, programamos nuestro estudio en base los procesos anteriormente referenciados. Además buscamos comprobar la calidad de los mismos, en función de las características que se consideran esenciales para una piedra aglomerada, una buena resistencia mecánica y dureza.

Durante el proceso de estudio, se pueden identificar tres etapas principales que determinan la evolución del estudio en cuanto a metodología, propiedades y acabado del material. Planteamos el siguiente diagrama de procesos de fabricación, que aporta una visión general sobre la metodología de fabricación que se ha llevado a cabo a lo largo de todo el estudio. Estos procesos han variado según la etapa del proyecto tal y como mostraremos posteriormente.

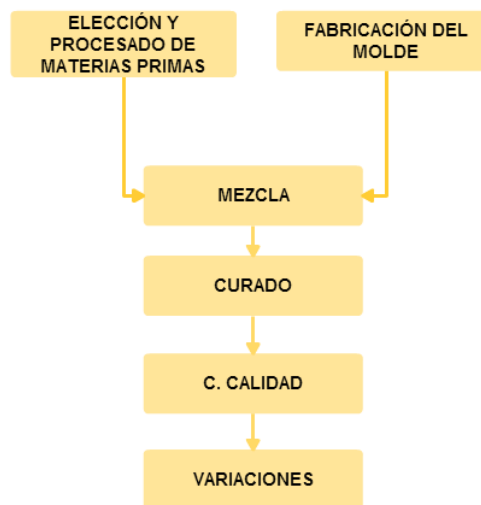


Figura V. Diagrama procesos de fabricación para este estudio.

Etapa 1:

En una fase inicial, se busca familiarizarse con el proceso de trabajo. Para ello se fabrican probetas con unas proporciones de partida. Estas probetas iniciales de fabricaron con un molde rudimentario que denominamos Molde 1 (que describiremos en el apartado 4.1.1), se fabrican probetas con unas proporciones iniciales.

Durante esta etapa se detectaron errores debido a la escasa precisión dimensional del molde, produciendo una mala reproducción de las probetas. Estos errores sirvieron para mejorar el método de procesado.

A las probetas preparadas en esta primera etapa no se les realizaron ningún ensayo, pues se considera que los valores obtenidos no serían representativos, debido a los errores cometidos en su elaboración.

Etapa 2:

En esta etapa se consiguió una mayor precisión en las dimensiones y composición de las probetas al mejorar el molde, el molde utilizado en esta etapa se denomina Molde 2. Esto, sumado a la existencia de dos moldes de iguales características, permitió fabricar mayor variedad de probetas con diferentes composiciones. A partir de los ensayos, se determinó que resina aportaba mejores condiciones, y la importancia de la granulometría de los agregados.

Etapa 3:

Para esta etapa, sabiendo que en los procesos de fabricación industrial de piedra aglomerada, se utilizan sistemas de presión y vaciado, se emplea un nuevo molde, Molde 3, diseñado y fabricado en base a este principio. El objetivo es conseguir una mejor compactación del material, que no se puede obtener con las condiciones de trabajo de las etapas anteriores.

Las combinaciones resina/árido que mejores resultados mostraron a flexión en la etapa 2, serán repetidas en esta etapa, y se compararán los resultados obtenidos en ambos casos. Con el fin de conocer lo determinante que serán estas nuevas condiciones de trabajo en la pieza final.

En la elaboración de estas piezas finales, se tendrá en cuenta el acabado que se puede ofrecer. Ya que uno de los factores importantes de la producción de piedra aglomerada, es las posibilidades estéticas que estas ofrecen.

4.1 Moldes

La fabricación de los moldes y adaptación de los mismos define claramente las tres etapas por las que ha pasado el conformado de nuestra piedra artificial. Identificaremos cada molde como Molde 1, Molde 2 y Molde 3 que coinciden con el orden cronológico de su utilización.

Su fabricación es una de las fases iniciales del estudio, que excepto el Molde 1, corren a cargo del proyecto “Diseño y caracterización de ecomateriales de construcción fabricados con residuos de vidrio”. Las dimensiones de los mismos se han estipulado en función de la normativa específica de los ensayos a flexión (Norma UNE EN 14617-2), que indica las dimensiones que deben tener las probetas de ensayo [19].

Además, a medida que hemos detectado carencias en nuestra fabricación hemos buscado aplicar las mejoras en los moldes, lo que ha implicado mejoras en nuestras piezas.

4.1.1 Molde 1

El molde inicial se fabricó de metacrilato y PVC, consta de varillas de 1cm x 1cm y de 1cm x 2cm de espesor, unidas a una placa rectangular de 20cm por 25cm y 2mm de espesor, con adhesivos de fraguado rápido.

Para desmoldar las piezas, implicaba desmontar el molde completo, lo que suponía una mala reproducción del proceso.

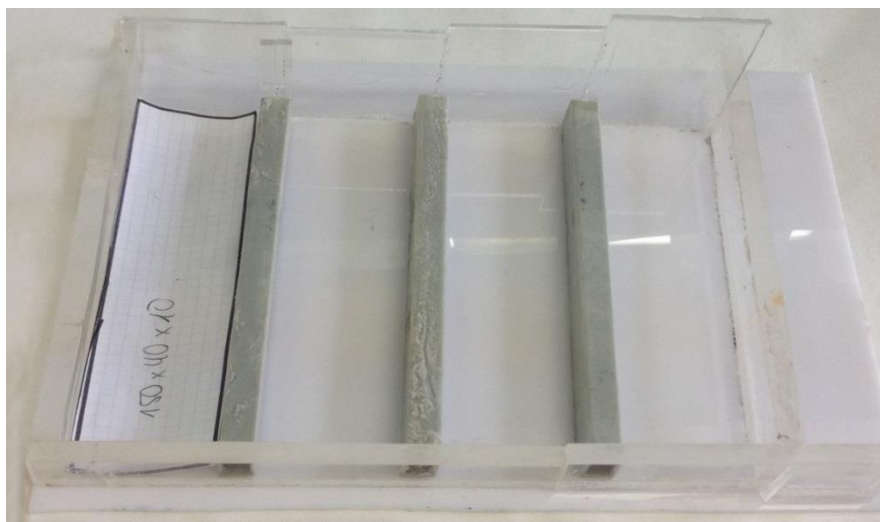


Figura VI. Molde 1.

4.1.2 Molde 2

En este caso se dispone de dos moldes iguales, cada uno están formado por dos placas de polietileno de 10,5cm de espesor, de 36cm de largo por 20cm de ancho. Fijadas mediante un sistema de unión desmontable utilizando 9 tornillos de cabeza avellanada, que permite la separación de las placas para el desmolde. Las dimensiones de la cavidad del molde, corresponden con las de las probetas para los ensayos a flexión.

Los moldes están numerados, como molde 2.A y molde 2.B, lo que permite enumerar las probetas según su posición en el molde.



Figura VII. Molde 2 unido y separado.

4.1.3 Molde 3

El Molde 3 está compuesto por un recubrimiento superior, que se apoya sobre una base a la que se conecta una bomba de aspiración de vacío.

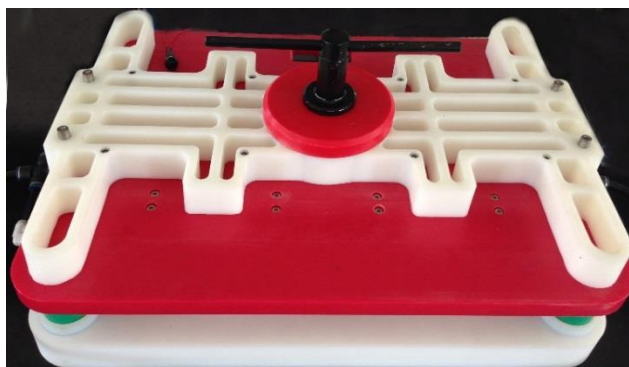


Figura VIII. Molde 3.

En el recubrimiento superior se incorpora el sistema de aplicación de presiones, para la compactación de la mezcla. En parte inferior del recubrimiento se dispone de machos que ejercen presión sobre la masa encajando en las cavidades del molde.



Figura IX. Recubrimiento superior, Molde 3.

En la base del molde se encuentran las cavidades, que permiten el moldeo seis probetas simultáneamente. Estas están conectadas mediante una serie de conductos a la bomba de aspiración de vacío. Además cuenta con un sistema digital de determinación de los valores de presiones.



Figura X. Base Molde 3.

La masa se depositaba en un primer momento sobre dos placas de metal mallado para su curado, que se disponen de forma que las aberturas no fuesen coincidentes entre sí para evitar en mayor medida la filtración de la mezcla.



Figura XI. Placas de apoyo Molde 3.

4.2 Materias primas

Los componentes de nuestra piedra artificial serán resina, vidrio triturado de diferentes granulometrías y en la última fase de estudio colorante. En primer lugar se procesará el vidrio para que pueda ser utilizado en la elaboración de las probetas. Posteriormente se debe concretar el tipo de resina con el que se obtendrán mejores resultados para nuestra piedra.

4.2.1 Resinas

La elección del tipo de resina a utilizar se hace en base a la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de las Series 1 y 2, realizados durante la segunda fase del estudio, los cuales concretaremos posteriormente. A continuación se muestran las resinas empleadas y las especificaciones de las mismas.

- Resina epoxi Supersap Clr-Clf y catalizador:

Distribuida por TNK Composite. Eco Resina a base de bio-recursos renovables diferenciándose del epoxi tradicional, que estaba compuesto principalmente por derivados del petróleo. La proporción resina/catalizador se fija en 100:50, lo que permite un tiempo de trabajo de entre 30-40 minutos. El tiempo de curado es de 24-48h.



Figura XII. Resina epóxica y catalizador.

- Resina de poliéster Tixotropada y Preacelerada, y Catalizador de peróxido de MEK, Quimbase 2000:

Distribuido por La Marina Tenerife. Se añade un 1,5% de catalizar respecto al total de resina empleada, como se trata de un dispensador en gotas se trabaja con 17 gotas por cada 30 gramos de resina. El tiempo de curado es igual que el de la resina epóxica. El tiempo de trabajo es de aproximadamente de entre 20-25 minutos.



Figura XIII. Resina de Poliéster y catalizador.

4.2.2 Colorante

Durante la tercera fase de estudio se empleará pasta pigmentada que se añade a la resina para aportar color a la masa. La cantidad de pasta depende del color que se quiera obtener, influyendo únicamente el acabado que se busque conseguir.

Aunque se especifica que la pasta pigmentada es para resina de poliéster, se ha empleado con resina epóxica, puesto que el fabricante asegura que no existe inconveniente en su utilización.



Figura XIV. Pasta pigmentada para resinas.

4.2.3 Procesamiento del vidrio

Los pasos básicos para el procesamiento del vidrio de envases son:

I. Selección y lavado:

Para la investigación se seleccionó el vidrio de envases blanco o incoloro, puesto que se prevé la posterior coloración de las piezas. Una vez seleccionados, se procedió a su limpieza, retirando las etiquetas, tapas y anillas de metal o plástico de los envases y demás restos que pudieran quedar en el interior de los mismos.

Después se introdujeron en un recipiente con abundante agua, procurando que éste quedara cubierto en su totalidad con el fin de humedecer y así eliminar con mayor facilidad los desperdicios que pudiera haber en dichos envases.

Seguidamente, se retiró con la ayuda de una bayeta y un cepillo los restos de pegamento que quedaron adheridos, y finalmente, se dejaron secar.



Figura XV. Vidrio secado al aire.

II. Trituración del vidrio:

En esta fase se trató de reducir el tamaño del vidrio hasta que sus partículas alcanzaran dimensiones iguales o similares a la de la arena natural. Para ello se rompieron los envases en un primer paso, mediante la trituradora de mandíbulas

(Figura XVI). Esta ejerce una acción mecánica intensa mediante el cierre de dichas mandíbulas, que permite el troceado grueso del vidrio obteniendo fragmentos de aproximadamente 100 a 40 mm, como se aprecia en la Figura XVI.



Figura XVI. Trituradora de mandíbulas.



Figura XVII. Vidrio a la salida de la trituradora de mandíbulas.

Para reducir esos fragmentos y obtener unas dimensiones de grano adecuadas, se introducen en una trituradora de rodillos, como la que se muestra en la Figura XVIII. Mediante el giro de dichos rodillos horizontales se tritura el vidrio, consiguiendo un árido fino ($\varnothing < 8$ mm) de color blanco, como el que se observa en la Figura XIX.



Figura XVIII. Tritadora de rodillos.



Figura XIX. Vidrio a la salida de la trituradora de rodillos.

III. Tamizado:

Después del triturado del vidrio se procede al tamizado del mismo, para ello se vierten pequeñas cantidades de vidrio sobre los tamices, previamente limpiados con agua destilada, secos y dispuestos de mayor a menor (2mm/ 1 mm/ 0.500mm/ 0.250mm/ 0.125mm/ 0.063mm) tal y como se muestra en la Figura XX.



Figura XX. Disposición de tamices.

El tamizado se llevó a cabo en seco y con movimiento manual, quedando retenidas las fracciones de vidrio de mayor tamaño a la altura de la rejilla en cada uno de los tamices, hasta lograr separar granulométricamente las fracciones del material. Del material añadido al sistema de tamices se desechó la fracción de vidrio que no atravesó el primer tamiz, donde quedó retenido por tener un diámetro $\varnothing > 2\text{mm}$.

IV. Almacenamiento e inventariado

Las partículas de vidrio se almacenaron por tamices en bolsas de plástico previamente etiquetadas y pesadas.

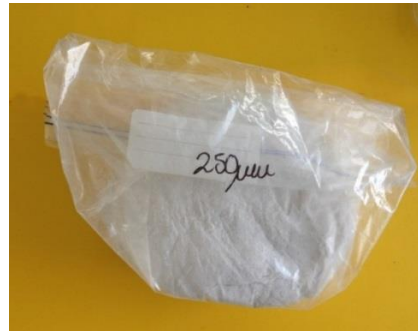


Figura XXI. Almacenamiento del vidrio de 250 µm.

Mediante una hoja de cálculo se registró la cantidad inicial de vidrio triturado. Una vez previstas las probetas que se elaborarían, se estimó la cantidad total de vidrio necesaria para programar una segunda fase de triturado teniendo en cuenta el vidrio necesario para la fabricación de las probetas. Para esta estimación se tuvieron en cuenta solo las probetas intermedias y finales, ya que las iniciales habían sido realizadas con vidrio disponible en el laboratorio de otros proyectos anteriores, y por lo tanto no se requirió triturar vidrio inicialmente.

CANTIDAD	INVENTARIO VIDRIO PRIMER TRITURADO						
	2 mm [g]	1 mm [g]	500µm [g]	250µm [g]	125µm [g]	63µm [g]	<63µm [g]
TRITURADA	317,00	611,00	1927,00	2618,00	1521,00	1299,00	389,00
PREVISTA	0,00	930,00	2670,00	2790,00	1910,00	1005,00	525,00
NECESARIO	317,00	-319,00	-743,00	-172,00	-389,00	294,00	-136,00

Tabla III. Inventariado y estimación de vidrio.

Finalmente, para la segunda fase de triturado se tuvo en cuenta que los valores mínimos necesarios de vidrio que se tenían que alcanzar son los que aparecen en color rojo en la Tabla III.

4.3 Elaboración de probetas

La elaboración de las probetas pasó por tres fases diferentes según el molde utilizado. En primer lugar se prepararon lo que hemos denominado como Probetas Iniciales, que se considera el punto de partida de nuestro estudio. Posteriormente se elaboran, ya en una segunda fase, las Probetas Intermedias para la elección de resina. Así como el estudio de la influencia granulométrica en las propiedades mecánicas de nuestra piedra artificial.

Por último, se elaboran las Probetas Finales, empleando el Molde 3 y estudiando las posibilidades de acabado que permite ofrecer el producto.

Dependiendo de la composición y del método de elaboración, cada probeta será designada según una nomenclatura específica. Las probetas serán marcadas y numeradas con un índice y un subíndice. Que corresponde con la serie y el número de probeta.

- Probetas Iniciales, designadas como Serie 0 y el número de probeta corresponde con el orden cronológico de su realización desde 1 hasta 8.

PROBETAS INICIALES	
Índice	Subíndice
SERIE	Nº DE PROBETA
0	1-8

Tabla IV. Designación probetas iniciales.

- Probetas Intermedias; la serie depende de la composición de la probeta (ver Tabla XI y
- Tabla XII) de 1 a 10, y el número de probeta corresponde con su posición en el Molde 2. Por ejemplo: las probetas de la Serie 1, tendrán subíndices del 1 al 6 es decir, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6, y así respectivamente con el resto de las series.

PROBETAS INTERMEDIAS	
Índice	Subíndice
SERIE	Nº DE PROBETA
1-10	1-6

Tabla V. Designación de probetas intermedias.

- Probetas Finales; la designación varía. El índice se designa en función del color que tienen, I (para las incoloras), B (para las blancas) y V (para las verdes). Y el subíndice, numeradas del 1 al 6 según su posición en el molde.

PROBETAS INTERMEDIAS	
Índice	Subíndice
SERIE	Nº DE PROBETA
I-B-V	1-6

Tabla VI. Designación de probetas finales.

4.3.1 Probetas Iniciales

Para la fabricación de las Probetas iniciales, se parte de las proporciones iniciales que se muestran en Tabla VII. Estas proporciones de partida, se modificarán según el objeto del estudio.

De la proporción total de resina, debemos tener en cuenta el porcentaje de catalizador según el tipo de resina empleada. Según las especificaciones del fabricante, se debe emplear 17 gotas de catalizador por cada 30 gramos de resina, y en el caso de la resina de epóxica, la relación resina/catalizador es 100:50.

CANTIDAD [g]	CONSTITUYENTE
60	Vidrio de 500 μm
30	Vidrio de 125 μm
10	Vidrio <63 μm
30	Resina

Tabla VII. Proporciones iniciales.

Se elaboraron 8 probetas iniciales, empleándose únicamente resina epóxica y trabajando con las proporciones iniciales y variaciones de estas especificadas en cada caso. Para la preparación de las probetas 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4, se realizaron de dos amasadas. La primera con las proporciones iniciales para una sola pieza. Y una segunda amasada multiplicando dichas cantidades por tres, tal y como se muestra en la Tabla VIII, empleando en ambos caso vidrio blanco de envases.

CANTIDAD [g]	CONSTITUYENTE
180	Vidrio de 500 μm
90	Vidrio de 125 μm
30	Vidrio <63 μm
60	Resina epóxica
30	Catalizador

Tabla VIII. Cantidades probetas 0.2, 0.3 y 0.4.

Debido a la disponibilidad de mármol blanco en el laboratorio, se procedió a fabricar dos probetas modificando el vidrio blanco de envases <63 μm , por mármol blanco de 63 μm . Para la realización de las mismas se dobló la cantidad de material respecto las proporciones iniciales, tal y como se muestra en la Tabla IX. Estas probetas serán denominadas como 0.5 y 0.6.

CANTIDAD [g]	CONSTITUYENTE
120	Vidrio de 500 μm
60	Vidrio de 125 μm
20	Mármol blanco de 63 μm
40	Resina epóxica
20	Catalizador

Tabla IX. Cantidades probetas 0.5 y 0.6.

Cabe destacar que para las probetas 0.1-0.4, en el recipiente en el cual se realizaba la amasada, se vertió en primer lugar el polvo de vidrio y posteriormente la resina. Para comprobar de qué manera era mejor la manipulación de la masa, para las probetas 0.5 y 0.6, se vertió en primer lugar la resina y luego el polvo de vidrio. De esta, forma la resina se adhería al envase y no ligaba bien con todos los áridos, lo que dificultaba la mezcla de los componentes. Por tanto, en el resto de preparaciones, siempre se vertió en primer lugar el polvo de vidrio y posteriormente la resina, consiguiendo unas mejores condiciones de trabajo.

Por último se desarrollaron las probetas 0.7 y 0.8. Variando las proporciones iniciales, se sustituye únicamente para estas probetas, el vidrio blanco de envases de 500 μm , por vidrio verde de envases de la misma granulometría. Disponible en el laboratorio de otros proyectos.

CANTIDAD [g]	CONSTITUYENTE
120	Vidrio verde de 500 μm
60	Vidrio blanco de 125 μm
20	Vidrio blanco de 63 μm
40	Resina epóxica
20	Catalizador

Tabla X. Cantidades probetas 0.7 y 0.8.

Únicamente se detectaron variaciones en la coloración de las mismas. Aunque no se puede afirmar la ausencia de alteraciones en las propiedades mecánicas, puesto que estas probetas no fueron sometidas a ensayos.



Figura XXII. Probetas 0.7, 0.5 y 0.1.

4.3.2 Probetas Intermedias

Las Probetas Intermedias se han preparado empleando el Molde 2. Distinguimos dos tipos de estas probetas, unas empleadas para la elección de resina, y otras para comprobar la importancia granulométrica del vidrio que compone la piedra.

I. Probetas para la elección de resina

Aunque para las Probetas Iniciales (Serie 0), solo se trabajó con resina epóxica, durante la segunda etapa del estudio, se analizó que tipo de resina ofrecía mejores condiciones de trabajo y propiedades mecánicas; y de este modo fijar el tipo de resina más adecuado para este estudio.

Para ello, manteniendo las proporciones iniciales, se elaboran dos tandas de seis probetas, en las que se emplea como aglomerante resina de poliéster y resina

epóxica. Estas probetas se denominarán como Serie 1 y Serie 2 respectivamente, obteniéndose las probetas desde 1.1 a 1.6, y las probetas desde 2.1 a 2.6.

SERIE	CANTIDAD DE MATERIAL									
	Vidrio Blanco						Resina de poliéster		Resina epóxica	
	1 mm [g]	500µm [g]	250µm [g]	125µm [g]	63µm [g]	<63µm [g]	Resina [g]	Cataliz. [gotas]	Resina [g]	Cataliz. [g]
1	-	60,00	-	30,00	-	10,00	30,00	17	-	-
2	-	60,00	-	30,00	-	10,00	-	-	20,00	10,00

Tabla XI. Proporciones Probetas Intermedias, Serie 1 y 2.

II. Probetas para la determinación de la importancia granulométrica

Para poder determinar la importancia del tamaño del grano del vidrio que conforman la piedra artificial, y la influencia de los mismo en las propiedades mecánicas. Se plantea seleccionar nueve combinaciones diferentes a partir de la proporción inicial, empleando únicamente resina epóxica como aglomerante, tal y como se justificará en los resultados correspondientes a las probetas de elección de resina.

Para ello, primero se seleccionaran las combinaciones posibles, posteriormente se comprobará la viabilidad de las mismas y finalmente se elaborarán dichas probetas.

- Elección de combinaciones

Una vez fijada la resina a emplear, se procede a determinar las combinaciones que permitan determinar de qué forma influye el tamaño del grano en las propiedades mecánicas del producto. A partir de las proporciones iniciales, y conociendo la cantidad de vidrio disponible tras la primera fase de triturado, se estipulan ocho nuevas series con diferentes composiciones granulométricas que se muestran en la Tabla XII.

SERIE	CANTIDAD DE MATERIAL						
	Vidrio Blanco						
	2 mm [g]	1 mm [g]	500 μ m [g]	250 μ m [g]	125 μ m [g]	63 μ m [g]	<63 μ m [g]
2	-	-	60,00	-	30,00	-	10,00
3	-	-	60,00	-	30,00	10,00	-
4	-	60,00	-	30,00	-	10,00	-
5	-	-	-	-	60,00	30,00	10,00
6	-	30,00	-	60,00	-	10,00	-
7	-	-	60,00	30,00	10,00	-	-
8	-	-	-	60,00	-	30,00	10,00
9	-	-	-	60,00	30,00	-	10,00
10	-	-	60,00	-	30,00	10,00	-

Tabla XII Proporciones Probetas intermedias, series 2-10.

La serie 2 y 3, difieren en el tipo de partículas de tamaño menor de 63 μm que hemos usado, en la Serie 3, se emplea mármol blanco en vez de vidrio blanco. En la serie 4 conservamos las proporciones de vidrio pero aumentamos el tamaño de todos los gramajes por el inmediatamente superior. En la serie 6, modificamos las proporciones de vidrio con respecto a la serie 4.

En la serie 5 se utilizan las granulometrías mínimas y similares, y en la serie 7 las medias. Las series restantes, 8,9 y 10, son combinaciones de ambas. En la Tabla XIII, se resume la posibilidad comparativa que justifica la elección de dichas combinaciones.

SERIES	JUSTIFICACIÓN
2-3	Mármol blanco de 63 μm / Vidrio blanco <63 μm .
2-4	Se aumentan todos los gramajes por el inmediatamente superior.
5	Se utilizan las granulometrías mínimas y similares.
6-4	Se alternan los gramajes superiores.
7	Se utilizan granulometrías medias y similares.
8-5	Se aumenta el gramaje superior, por la inmediatamente mayor.
9-8	Se intercambia la granulometría intermedia.
1-2	Se aumenta el gramaje inferior, por el inmediatamente superior.

Tabla XIII. Justificación de las combinaciones empleadas.

- Comprobación de proporciones

Para comprobar que la cantidad de material que se ha fijado por probeta, es la suficiente para llenar las dimensiones del molde, se elabora una probeta de cada una de las combinaciones de proporciones.

En todos los casos la cantidad de material fue la correcta, y además las condiciones de trabajo permitían que estas proporciones quedasen fijadas. Por lo que se mantienen las proporciones planteadas y se procede a la elaboración de las probetas. Todas serán ensayadas a flexión y con los fragmentos de las probetas que se seleccionen según los resultados, se realizan los ensayos de densidad y absorción de agua.



Figura XXIII. Probetas Intermedias, Series 3-10.

4.3.3 Probetas Finales

En vista a los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las Probetas Intermedias (Apartado 6.1.1), en esta última fase de estudio se decide repetir la fabricación de las probetas con las composiciones de las Series 2 y 8; que son las que mejor comportamiento han tenido a flexión. En cuanto al acabado de las probetas, la que mejor aspecto presenta es la Serie 6, debido a la granulometría del vidrio utilizado para su fabricación. Por eso se decide también repetir la fabricación de estas probetas. Pese a que con esta serie se obtuvieron peores resultados, los valores eran

satisfactorios al compararlos con valores de piedra natural comercializada para este tipo de producto.

A estas últimas probetas se les aplica coloración a la masa, esto no será determinante en las propiedades mecánicas, pero si en el las posibilidades de acabado de las mismas, siendo este uno de los puntos fuertes de este tipo de productos. Concretamente la repetición de la Serie 2 no recibirá coloración, por lo que se denomina incolora (I), la repetición de la Serie 6 se le aplicará colorante blanco (B), y a la repetición de la Serie 8 el color verde (V). Estas probetas se designarán en función de su coloración.

Para la fabricación de estas probetas se emplea el Molde 3, con el fin de justificar lo determinante que es la aplicación de vacío y presión durante el curado en las propiedades finales de las piezas. Además a las probetas de la Serie B y V se les realizaran los ensayos de dureza.



Figura XXIV. Probetas Finales, Series I, B y V.

4.3.4 Preparación de las probetas

La preparación de las probetas se realiza siguiendo siempre el mismo proceso, las variaciones que han surgido se especifican en cada caso.

Para la realización de las probetas, se pesan las cantidades de vidrio de diferentes granulometrías según las proporciones estipuladas para la serie a realizar. Posteriormente, una vez mezclado el polvo de vidrio y depositado en el recipiente en el que se vaya a realizar la mezcla, se pesa la cantidad de resina. A continuación se procede a la mezcla de los componentes, buscando obtener una masa lo más homogénea posible.

Antes de verter las amasadas en los moldes, se debe aplicar desmoldante a los mismos, para facilitar la extracción de las piezas tras el curado. Tras el tiempo de curado, entre 24 y 48 horas se desmoldan y se preparan para los respectivos ensayos.

I. Pesado del grano

Según la serie que se vaya a realizar, se pesan los componentes de vidrio por separado. Se empleará una balanza con lectura de tres cifras decimales para asumir el menor error posible en el pesado. Durante el proceso siempre se ha tenido un error de medida en la centésima o inferior.

Puesto que el peso máximo que soporta la balanza empleada es de 400 gramos, y que en uno de los componentes se debía pesar 420 gramos, se realizan las pesadas en dos veces. Se muestra el proceso de pesado para la Serie 2, de mayor a menor granulometría.

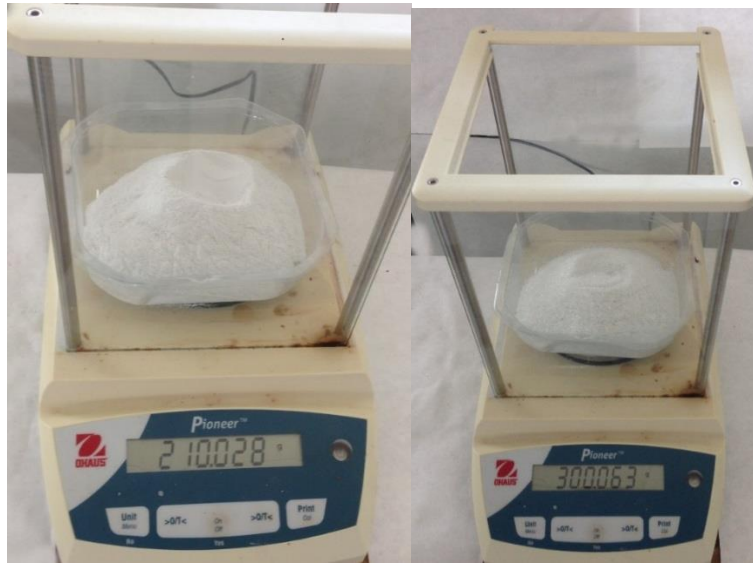


Figura XXV. Pesada del grano de 500 μm , Serie 2.

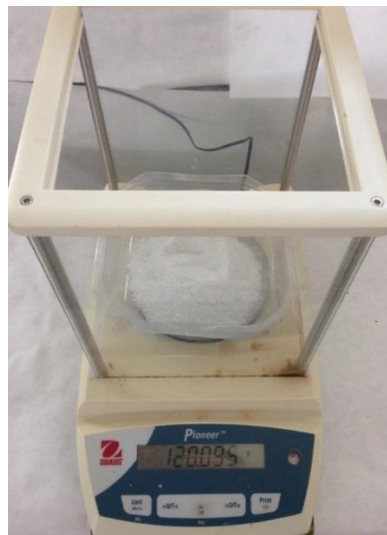


Figura XXVI. Pesada del grano de 125 μm , Serie 2.



Figura XXVII. Pesada del grano $<63\mu\text{m}$, Serie 2.

Por último, se pesan las cantidades de resina, utilizando una balanza con menor precisión. La resina se vierte en vasos de plásticos desechables, en los que se realizara la mezcla con el catalizador, y que posteriormente se verterán en el recipiente mayor donde se realizará la amasada. A continuación mostramos la pesada para la resina epóxica y el endurecedor, durante la segunda fase de estudio.



Figura XXVIII. Pesada de la resina epóxica y el catalizador, Serie 2.

En el caso de la resina de poliéster, únicamente se pesa la resina, se añaden en el mismo recipiente las gotas de catalizador, y se mezclan.

II. Amasada

Tras pesar las materias primas se vierten en el recipiente en el que se realizará la amasada. Se ha empleado un recipiente cilíndrico con tapa, que facilita amasar con ayuda del mezclador.



Figura XXIX. Vertido de materias primas en recipiente para amasada.

En la primera fase de trabajo, la amasada se realizaba de forma manual. Durante esta primera toma de contacto, y al aumentar las cantidades de material en las amasadas. Se detectó que era necesario emplear un sistema de amasado mecanizado, para agilizar el proceso de trabajo y conseguir una masa más homogénea. Por lo que se empleó el mezclador fijado a un taladro.



Figura XXX. Proceso de amasado con mezclador.

Para la tercera fase de estudio, se añade el colorante a la resina, una vez se ha mezclado resina y catalizador.



Figura XXXI. Coloración de la amasada.

III. Preparación de moldes

Previamente a verter la masa en los moldes, estos se preparan con cera desmoldante y alcohol polivinílico, para facilitar la extracción de las probetas.

Para el Molde 2, se aplica la cera por la superficie quitando el exceso con un papel y alcohol polivinílico en la base, justo antes de verter el contenido de la masa en el molde para evitar que se evapore. Hay que tener especial cuidado en las aristas rectas donde se producen una mayor acumulación de tensiones.

En el caso del Molde 3, se aplica cera por las aristas donde se produce mayor acumulación de tensiones, y se aplicará alcohol polivinílico sobre la superficie de apoyo.

IV. Desmoldado

El desmolde de las piezas depende del molde empleado. En el caso del Molde 1, para la extracción de la pieza se debe desmontar el molde completo, debiéndose unir de nuevo los elementos para un nuevo uso.

Al extraer las piezas del Molde 2, se desatornillan las placas que lo conforman. Las piezas quedarán fijadas a la placa superior, por lo que para separarlas se debe aplicar tensión a las mismas.

Una vez desmoldadas, las piezas son marcadas y numeradas, según la designación correspondiente.

4.3.5 Análisis de fallos en los moldes

A lo largo del proceso de elaboración de las probetas se detectaron errores que hemos clasificado según el molde utilizado en cada caso. Estos errores justifican la evolución en los moldes que se emplean, así como las variaciones que ha sufrido nuestro estudio.

4.3.5.1 Análisis de fallos Molde 1

- No se obtienen resultados uniformes:
En el proceso de desmoldado, se debe separar el molde completo para la extracción de las piezas, quedando las varillas del molde unidas a las

probetas, tal y como se muestra en la Figura XXXII. Esto supone una mala reproducción del proceso, ya que no se garantiza que el Molde 1 mantenga siempre las mismas dimensiones.



Figura XXXII. Desmoldado Molde 1.

Para comprobar la uniformidad del proceso se pesaron las piezas, detectándose una significativa variación en los pesos, lo que implica una excesiva porosidad en las piezas (ver Figura XXXIII), y supone malas propiedades mecánicas.

PROBETA	PESO [g]	PROBETA	PESO [g]
0.1	110,207	0.5	119,618
0.2	119,003	0.6	118,072
0.3	122,735	0.7	117,328
0.4	121,452	0.8	114,172

Tabla XIV. Pesos probetas Serie 0.



Figura XXXIII. Aspecto de las pobretas 0.1-0.4.

4.3.5.2 Análisis de fallos Probetas Intermedias

- Formación de bolsas y burbujas en la base de las probetas:
Al depositar la masa en el molde se busca la mayor compactación posible del material, para evitar la formación de bolsas y burbujas, pero no se consigue una eliminación total de las mismas, puesto que esto se realiza manualmente. Por lo que se detectan imperfecciones en la base de las probetas, siendo más apreciable en las de las Serie 8 y 9.

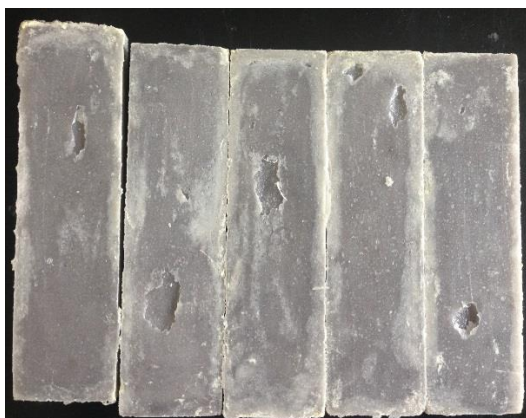


Figura XXXIV. Base probetas Serie 8.



Figura XXXV. Base probetas Serie 9.

- **Proceso de desmoldado:**
Al aplicar tensión a las probetas durante el desmolde, ocasionó la fractura de dos probetas, las probetas 5.2 y 6.4. Por lo que el proceso de desmoldado supone un inconveniente para la utilización de este molde.

4.3.5.3 Análisis de fallos Molde 3

- **Limitaciones en el proceso de trabajo y repetición de las probetas:**
Puesto que solo se dispone de un único molde, el proceso de trabajo es mucho más lento respecto al que se lleva a cabo durante la fabricación de probetas con el Molde 2. Esto ha limitado el número de probetas a repetir.
- **Modificación del sistema de apoyo de las probetas en el molde:**
El sistema de apoyo, compuesto por dos placas mayadas, para el curado de las probetas no fue efectivo, la masa y la resina se colaban y pegaban las dos placas, como se aprecia en la Figura XXXVI.

Esto dificultaba la separación de las probetas y las placas, dado que la pieza se incrusta y no permite el deslizamiento sobre la placa. Quedando la pieza tal y como se aprecia en la Figura XXXVII.



Figura XXXVI. Placa de apoyo Molde 3, filtración de la resina.

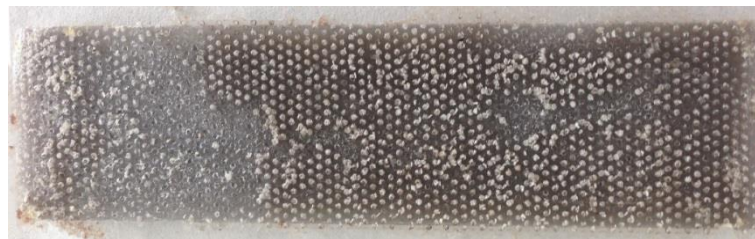


Figura XXXVII. Base probetas

De esta forma, las placas de apoyo quedaban obstruidas. Por lo que fueron sumergidas en Acetona, para facilitar su limpieza y permitir su reutilización.



Figura XXXVIII. Placas de apoyo en acetona.

Para solucionar estos fallos, se procedió a utilizar una única placa y una tela empapada en alcohol polivinílico, de esta forma se impedía la pérdida de masa y se facilitó el desmolde.

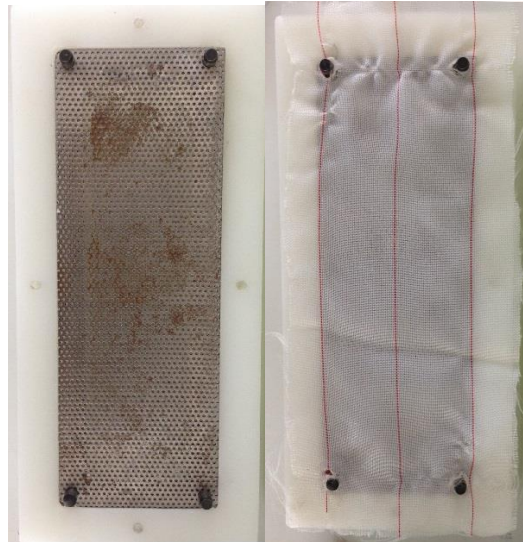


Figura XXXIX. Placa de apoyo y tela.

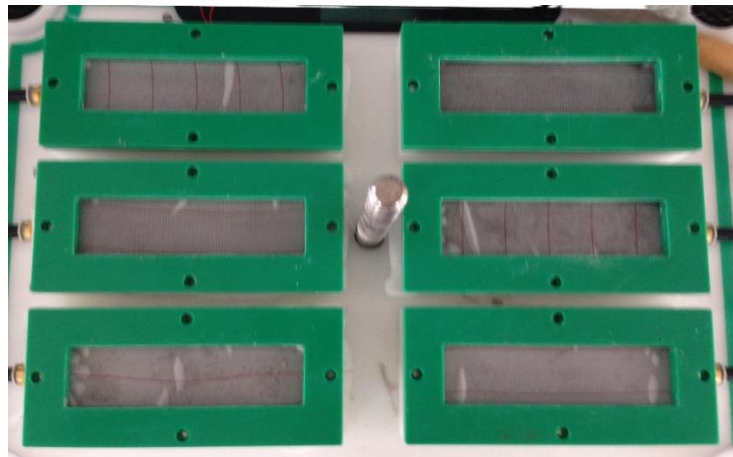


Figura XL. Telas empapadas en alcohol polivinílico en Molde 3.

- El sistema de aspiración de vacío y aplicación de presiones no funcionaba correctamente:

El molde no estaba lo suficientemente hermético, como para que el proceso de aspiración de vacío pudiese realizarse. Además, el sistema de aplicación de presiones no permitía determinar la cantidad de presión ejercida. Por lo que no se considera que estas muestras hayan curado con presión y vaciado.

4.3.6 Preparación para ensayo

Una vez que las piezas son desmoldadas, se preparan para poder ensayarlas. Para que la superficie de apoyo sea uniforme y las medidas se ajusten a las especificadas en la norma, se lijan empleando una lijadora de banda Bosch PSB 75A, y papel de lija Dexter de tamaño de grano 80 y 120. Aunque las piezas sean relativamente uniformes, es necesario ajustar las dimensiones y rebajar las aristas que presentan para facilitar su manejo.



Figura XLI. Lijadora de banda Bosch PSB 75 A.



Figura XLII. Papel de lija Dexter de 80 y 120.

En el anexo ANEXO I. Fotográfico se puede apreciar el aspecto de las probetas antes y después del lijado.

4.3.7 Protección individual

Durante el proceso de trabajo, se deben emplear los equipos de protección individual necesarios para el manejo de los productos que se utilizan. Tanto para la manipulación de las resinas, como para el triturado y pesado del vidrio, y en el proceso de preparación de las probetas. Se emplean guantes, mascarilla y bata, durante el proceso de lijado además se emplean gafas de protección.

5. Ensayos

Para la caracterización de la piedra artificial se deben llevar a cabo los ensayos específicos para la piedra aglomerada, que se incluyen en el paquete de normas UNE EN 14617 referente a los métodos de ensayo de piedra aglomerada.

Para la caracterización total de la piedra aglomerada la norma exige que se elaboren todos los ensayos, pero debido al tiempo y a la accesibilidad no se han podido realizar todos. De los ensayos que se incluyen se han seleccionado cuatro, que podían ser realizados en el laboratorio de Materiales del Dpto. de Ingeniería Industrial; y que se consideran determinantes en la caracterización, y en base a los cuales se sacan las conclusiones. Se realizarán los ensayos de resistencia a flexión, microdureza Knoop, y la densidad aparente y absorción de agua. La norma de piedra aglomerada no especifica el ensayo de dureza que se debe realizar, por lo que se seguirá en ensayo de dureza para la piedra natural. Además se realizará sobre algunas muestras microscopía digital.

Los equipos utilizados se encuentran todos disponibles en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Ingeniería Industrial de la ULL.

5.1 Resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2)

Los ensayos a flexión son ensayos sencillos y de gran interés tecnológico. Nos permiten conocer la respuesta a flexión de diferentes materiales. El ensayo consiste en la aplicación de una fuerza en el centro de la probeta a ensayar, que se coloca sobre dos rodillos de apoyo, tal y como se muestra en la Figura XLIII, incrementando la carga uniformemente hasta que la probeta rompa.

Este ensayo nos permite determinar la resistencia a flexión así como el módulo a flexión, entre otros parámetros.

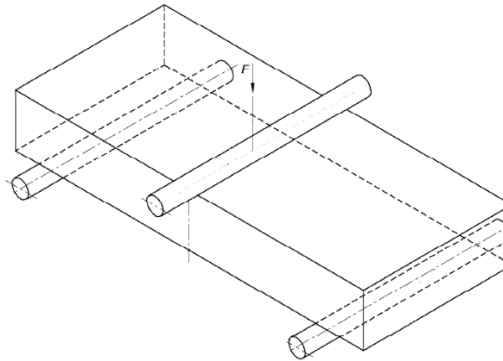


Figura XLIII. Disposición de la probeta sobre los rodillos de carga [19].

Para calcular la resistencia a flexión se emplea la siguiente expresión:

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

Siendo:

h, espesor de la muestra.

l, distancia de apoyo de los rodillos.

b, ancho de la muestra.

F, carga de rotura.

Para el cálculo del módulo a flexión se toma se siguiente ecuación:

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

Siendo:

l , distancia de apoyo de los rodillos.

m , pendiente de la curva a flexión.

b , ancho de la muestra.

h , espesor de la muestra.

El ensayo se ha realizado empleando la máquina de ensayos mecánicos *Shimadzu Autograph* con capacidad de carga de 50kN como máximo y accionamiento electromecánico, controlada mediante el sistema informático *Trapezium* de *Shimadzu* (Figura XLIV).



Figura XLIV. Máquina de ensayos mecánicos Shimadzu Autograph.

5.2 Densidad aparente y absorción de agua (UNE-EN 14617-1)

Este ensayo se realizó sólo para las probetas intermedias de la Serie 2, 6 y 8, una vez finalizado el ensayo de resistencia a flexión. Para ello primero se acondicionan las probetas tal y como regula la norma, éstas se secan hasta peso constante, en condiciones de humedad y temperatura controladas. Las masas de las probetas después del secado se denominan M_0 . Se sumergen las probetas en agua a $20 \pm 2^\circ\text{C}$, de forma que queden totalmente cubiertas.

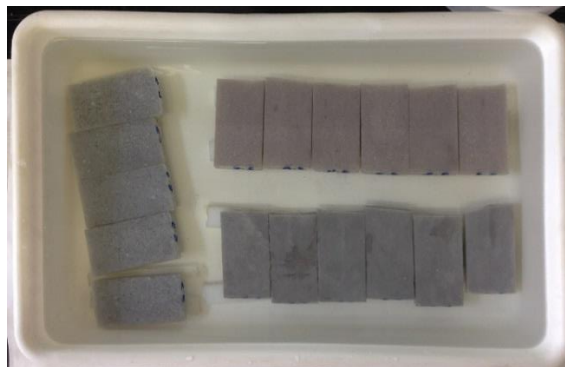


Figura XLV. Probetas sumergidas.

Se tomarán datos de las masas de las muestras fuera del agua (M_t), previamente secadas con un paño húmedo. Estos datos se tomarán en intervalos de 1h, 8h y 24h, y posteriormente en intervalos de 24h desde el inicio del ensayo, hasta que durante tres pesadas consecutivas la variación de pesos sea menor del 0,1%. Inmediatamente después de la última pesada, se pesará con una balanza hidrostática la muestra sumergida en agua (M_a).

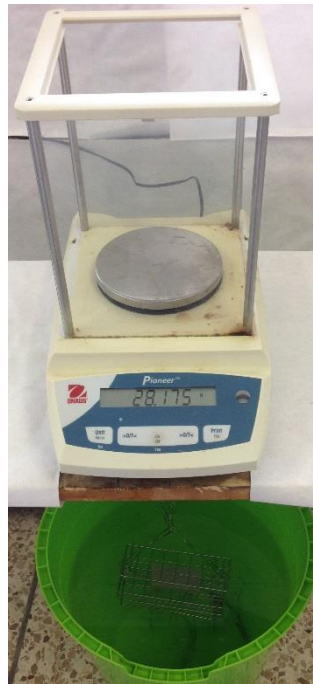


Figura XLVI. Pesada hidrostática de las probetas.

Se determinarán los parámetros de densidad aparente (M_V), absorción de agua (C) empleando las siguientes ecuaciones:

$$M_V = \frac{M_o \rho_{H_2O}}{M_t - M_a}$$

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

Siendo:

ρ_{H_2O} , la densidad real del agua a 20°C [14].

Para este ensayo se ha utilizado una balanza de precisión Pioneer de OHAUS, con una sensibilidad de 0,001 gramos y capacidad máxima de 3,5 kilogramos. Permite el pesaje sobre el plato, y por debajo suspendiendo la muestra.



Figura XLVII. Balanza Pioneer OHAUS.

5.3 Dureza Knoop (UNE-EN 14205)

Para la realización de los ensayos de microdureza Knoop, se utilizó un Microdurómetro Struers Duramin (Figura XLIX). En ensayo consiste en la realización de una serie de hendiduras sobre la muestra previamente pulida, empleando para ello un indentador piramidal de diamante.

Este ensayo se llevará a cabo en las probetas finales de la Serie Blanco y Verde, tras los ensayos a flexión.

Antes de la realización del ensayo se debe preparar las probetas, para ello, se emplea una pulidora automática Struers Labapol-5 (Figura L), con discos abrasivos de grado 320, 800 y 1200 para el desbaste. Y pasta de alumina de $5\mu\text{m}$ y $1\mu\text{m}$ para el pulido (Figura LII), realizándose sobre una de las caras de la muestra.

Se establece en el sistema del microdurómetro el número de indentaciones, que en este caso será un total de 20 indentaciones por muestra, separadas 1mm entre ellas. La carga sobre el indentador se ajustará para obtener una huella de fácil lectura, que permita medir la longitud de la diagonal de la hendidura, tal y como se aprecia en la Figura XLVIII, señalizada la indentación en color rojo. Con estos parámetros se obtiene el valor de la dureza Knoop.

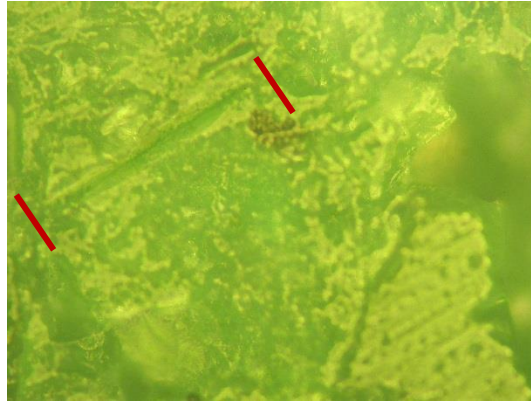


Figura XLVIII. Observación al microscopio, indentación dureza Knoop.



Figura XLIX. Microdurómetro Struers Duramin -50.

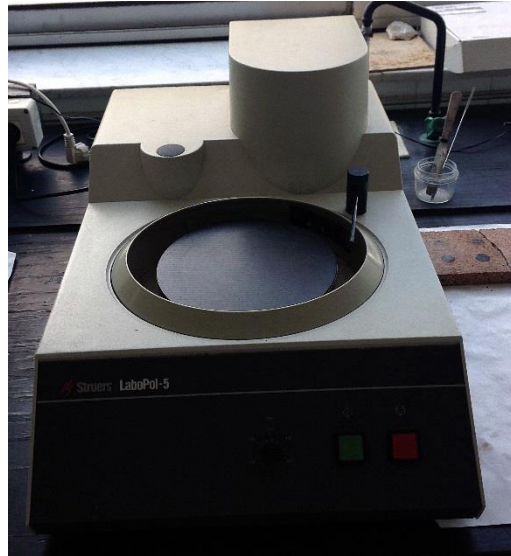


Figura L. Struers Labapol-5.



Figura LI. Struers SiC-Paper 800.



Figura LII. Paños para pulido.

5.4 Microscopía digital

Se realizó microscopía digital para poder observar la estructura macroscópica de las probetas y observar las posibles reacciones de la resina con el vidrio.

Las probetas a las que se les realizará la microscopía digital son las probetas que han sido seleccionadas para la prueba de dureza, tras haber sido preparadas siguiendo el procedimiento del apartado 5.3. Para ello se utilizó un microscopio óptico digital Dino-Lite modelo AM -211 (Figura LIII).



Figura LIII. Microscopio óptico digital Dino-Lite.

6. Resultados y discusión

6.1 Resistencia a flexión (UNE-EN 14617-2)

Los ensayos se realizan en diferentes momentos, en primer lugar se ensayan las Probetas Intermedias para fijar el tipo de resina, y posteriormente las probetas que determinan la importancia granulométrica en las propiedades de la piedra. En base a los resultados obtenidos, se elaboran las Probetas Finales que también serán ensayadas.

6.1.1 Probetas Intermedias

Una vez realizado el ensayo, a partir de los datos obtenidos, se representa gráficamente los valores de fuerza frente a deflexión para cada una de las probetas ensayadas, y en el Anexo II se muestran las gráficas para cada una de las series. A partir de estas graficas se calculan los parámetros de modulo a flexión (E_{fl}) y resistencia a flexión (R_{fl}), según las ecuaciones mostradas en el apartado 5.1. Se realiza una media de los valores de las probetas de cada serie, obteniéndose así un valor medio por serie.

A continuación se presentan los resultados de las probetas denominadas Intermedias. Comenzamos presentando los resultados de la Serie 2, la cual está fabricada con las proporciones iniciales de árido y resina epoxi. Estos resultados se muestran en la Tabla XVIII y en la Figura LIV.

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
2.1	5723,571	33,572
2.2	6168,063	39,123
2.3	4903,926	34,446
2.4	4859,301	28,329
2.5	6799,760	36,037
2.6	7496,572	39,721
MEDIA	5991,865	35,205

Tabla XV. Resultados por muestra, ensayo a flexión Serie 2.

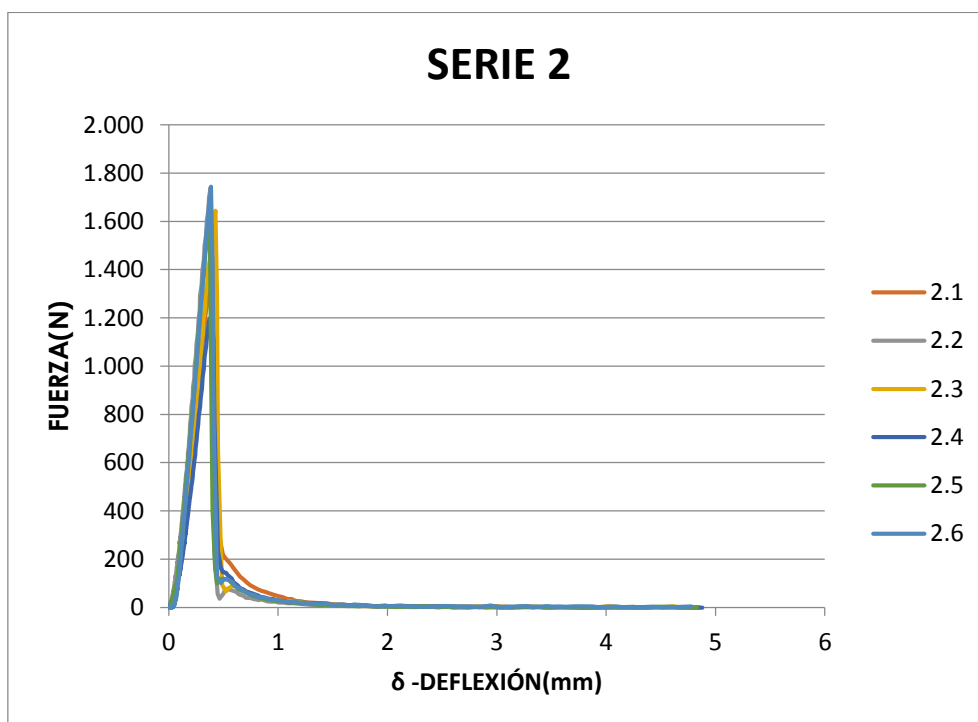


Figura LIV. Gráfica fuerza VS. Deflexión, Serie 2.

Como se observa en la gráfica todas las probetas siguen el mismo comportamiento, alcanzado prácticamente el mismo valor de fuerza máxima entre 1400 y 1700 N. Lo que conlleva que los valores de modulo a flexión y resistencia a

flexión sean muy similares entre sí. Esta homogeneidad en los parámetros se observa en prácticamente todas las series.

Elección de resina

Para la selección de la resina, se comparan los resultados de las probetas realizadas empleando las mismas proporciones y granulometría del vidrio, pero diferente resina. Dichas probetas son las correspondientes a las series 1 y 2, de las Probetas Intermedias.

	Efl [Mpa]	Rtf [Mpa]
SERIE 1	2467,052	13,858
SERIE 2	5991,865	35,205

Tabla XVI. Resultados a flexión, elección de resina.

Como se observa en la Tabla XVI, los valores de resistencia a flexión (Rtf) y módulo (Efl), son muy superiores en la Serie 2. Siendo esta serie la que emplea resina epóxica como aglomerante, frente a la resina de poliéster. Teniendo en cuenta los parámetros de la Tabla I, que hace referencia a los valores característicos de cada resina, estos resultados eran relativamente esperados. Pues el epoxi suele presentar valores superiores a lo del poliéster, en resistencia y modulo a flexión.

Pero no solo era determinante en el análisis, las propiedades mecánicas que las resinas ofrecen a la piedra artificial. También se buscaba conocer la facilidad de trabajo que ofrecía cada tipo de resina. Pues aunque los parámetros mecánicos fuesen superiores, la capacidad de trabajo es un factor importante en el proceso de producción. El tiempo de trabajo y el acabado que ofrece la resina epóxica frente a la resina poliéster, influyeron en que se fijase esta como la mejor resina para nuestra piedra artificial.

Cabe destacar, que el acabado que ofrece la resina de poliéster, no es uniforme. Lo que requiere un mayor lijado para conseguir la uniformidad de la probeta y poder realizar los ensayos a flexión.

Efecto del tamaño del grano

Para estudiar la influencia del tamaño de grano en las propiedades mecánicas de nuestra piedra artificial, hemos preparado 9 series con diversas combinaciones granulométricas (ver apartado 4.3.2) y la misma resina, los valores medios del módulo a flexión y de la resistencia a flexión de dichas probetas se muestran en la siguiente tabla. Los resultados de cada uno de los ensayos a flexión individuales se encuentran en el ANEXO III. Resultados por muestra.

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
SERIE 2	5991,865	35,205
SERIE 3	5668,164	33,732
SERIE 4	5912,978	33,085
SERIE 5	5143,567	34,534
SERIE 6	4402,159	28,593
SERIE 7	4604,982	28,918
SERIE 8	5731,950	36,919
SERIE 9	5164,108	35,140
SERIE 10	4739,250	30,518

Tabla XVII. Resultados a flexión, importancia granulométrica.

Podemos observar que los parámetros obtenidos son bastante homogéneos, independientemente de la granulometría que se utilice, tanto para el módulo de flexión como para la resistencia a flexión. Por tanto no podemos considerar significativas las variaciones de resultados respecto a la granulometría empleada, y no se puede asegurar que el tamaño del grano sea determinante en las propiedades mecánicas de la pieza.

Analizando los resultados se puede identificar una ligera tendencia a un aumento de la resistencia y el módulo a flexión, para aquellas probetas realizadas con vidrio de granulometría intermedia (serie 2, y serie 8), esto puede ser debido a una mayor compactación de los granos.

Las probetas que presentan los mejores resultados de resistencia a flexión son las correspondientes a la Serie 8, seguida de la Serie 2, que además tiene el máximo valor de módulo a flexión. Por el contrario el menor valor de resistencia a flexión y módulo obtenido es el de la Serie 6, pero pese a ser el menor valor, la diferencia de valores es bastante pequeña.

En el caso de la serie 6, se emplean granos de mayor tamaño y esto ha provocado, peores resultados en los análisis.

Así, se seleccionaran las Series 2, por ser tener la composición inicial, además de que junto con la Serie 8 son la que mejores resultados obtenidos en cuanto a resistencia a flexión. Y la Serie 6, por ser la que peor resultados ha obtenido, aun siendo estos valores significativamente mayores a los de encimeras naturales, y por el buen acabado que presenta.

6.1.2 Probetas finales

Los resultados obtenidos de las Probetas Finales, que se muestran en la Tabla XVIII, Tabla XIX y Tabla XX, se comparan con los valores de las Probetas Intermedias con la misma composición. En un primer momento podemos esperar que se mejoren los resultados anteriormente obtenidos, pero debido a que los sistemas de presión y de vacío no funcionaron correctamente durante el proceso de curado, no podemos determinar de qué forma han influido, y sólo podemos comprobar la repetitividad de los resultados.

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
TRANSPARENTE	8133,944	33,910
SERIE 2	5991,865	35,206

Tabla XVIII. Resultados a flexión serie Transparente, comparación Serie 2.

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
BLANCO	6009,124	29,684
SERIE 6	4402,159	28,593

Tabla XIX. Resultados a flexión serie Blanco, comparación Serie 6.

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
VERDE	5281,684	27,640
SERIE 8	5731,950	36,919

Tabla XX. Resultados a flexión serie Verde, comparación Serie 8.

La resistencia a flexión solo mejora en la muestra Blanco, y en el resto de muestras disminuye. Estos valores no se pueden considerar significativos, puesto que la máxima variación es menores a un 25%. En el caso del módulo a flexión, excepto en las probetas Verde, este valor sí que mejora en torno a un 30%.

Por tanto, afirmamos la repetitividad de los resultados, al obtener valores de resistencia y modulo a flexión prácticamente iguales en ambos casos. Y además nos aseguramos que la coloración no influye en las propiedades mecánicas de las muestras.

6.2 Densidad aparente y absorción de agua (UNE-EN 14617-1)

Los resultados del ensayo realizado solamente para las series 2,6 y 8 de las Probetas Intermedias se muestran en la Tabla XXI.

SERIE	Densidad aparente M _v [kg/m ³]	Absorción de agua C [%]
2	1887,480	0,121
6	1803,542	0,371
8	1814,298	0,315

Tabla XXI. Resultados densidad y absorción de agua.

Los valores de densidad aparente son homogéneos, ya que la variación es menor a un 4%. Los valores de densidad aparente de piedra natural (mármol blanco) y piedra aglomerada industrial a los que hemos tenido acceso, están en torno a 2500 kg/m³, especificados en el ANEXO IV. Valores comerciales. Nuestra densidad está significativamente por debajo de este valor, lo que podemos achacar a la falta de compactación el proceso de curado, que podría mejorarse si se hubiese efectuado la presión y vacío durante el curado.

Los valores de absorción de agua, son relativamente bajos, aunque no se pueden considerar homogéneos.

6.3 Microdureza Knoop (UNE-EN 14205)

En la Tabla XXII se muestran los valores medios de microdureza Knoop de las probetas de las series Blanco y Verde.

En el ANEXO III. Resultados por muestra, concretamente en el apartado III.3. Ensayo de dureza Knoop, se muestra de forma detallada los resultados de las medidas de microdureza Knoop para cada una de las muestras.

SERIE	Dureza [HK]
BLANCO	29,31
VERDE	34,43

Tabla XXII. Resultados dureza Knoop.

Según los resultados que se han obtenido, analizando los valores de dureza, y los valores de resistencia y módulo a flexión de las probetas finales Blanco y Verde. Se observa que la dureza es inversamente proporcional a la resistencia a flexión y modulo a flexión. Es decir, existe tendencia a obtener menor dureza, con mejores resultados de resistencia a flexión y viceversa.

6.4 Microscopía digital

En la Figura LV y en la Figura LVI se muestran las micrografías correspondientes a la serie Blanco y Verde, respectivamente. En ambas fotos se aprecian los diferentes constituyentes de nuestra piedra aglomerada, distinguimos entre la matriz y el vidrio. Podemos observar que en la serie B, la granulometría del vidrio es superior a la serie V. Dentro del círculo naranja observamos una partícula de virio de tamaño 1 mm en la Figura LV.

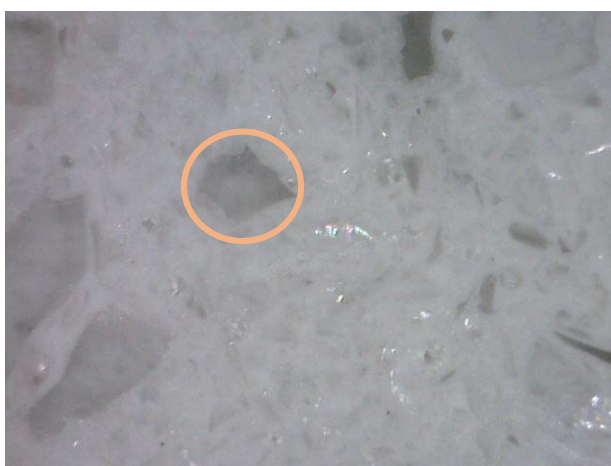


Figura LV. Microscopía digital, Serie Blanco.

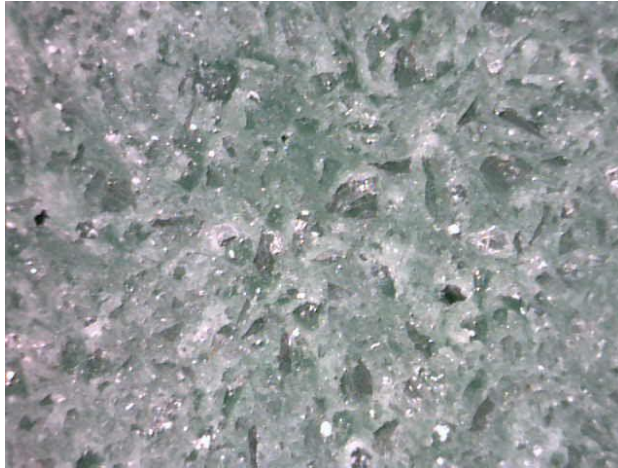


Figura LVI. Microscopía digital, Serie Verde.

En ninguna de las probetas observadas se aprecia reacciones no deseadas del vidrio con la resina, como si se ha apreciado en otros materiales fabricados con vidrio. Por tanto, la resina solo actúa como aglomerante entre las distintas partículas de vidrio.

7. Resumen de resultados

Con los datos obtenidos en los diferentes ensayos realizados podemos caracterizar de forma general la piedra aglomerada preparada. Un resumen de dichos resultados se muestra en la Tabla XXIII.

Resistencia a flexión [MPa]	27-36
Modulo a flexión [MPa]	4400-8133
Densidad aparente [kg/m³]	1803-1887
Absorción de agua [%]	0,12-0,37
Dureza [HK]	29-34

Tabla XXIII. Resumen de resultados, piedra aglomerada.

A partir de estos valores podemos comparar nuestros resultados con los parámetros tabulados la piedra aglomerada industrial, y el mármol blanco natural a los que se ha podido acceder, disponibles en ANEXO IV. Valores comerciales.

Los valores conocidos de resistencia a flexión de la piedra aglomerada comercial, entre 59-67 MPa, son significativamente superiores a los nuestros. Pero analizando los valores de resistencia a flexión para el mármol blanco natural, que están en torno a 12,1-14,2MPa, observamos que la resistencia a flexión en nuestro caso más desfavorable duplica este valor, mejorando significativamente los valores de las encimeras naturales comercializadas. Por tanto los parámetros obtenidos en nuestro estudio son suficientes para su comercialización, puesto que son superiores a los de piedra natural, que ya de por si se consideran resistentes para su uso.

La absorción de agua de nuestra piedra es ligeramente superior a los conocidos para mármol blanco y piedra aglomerada que oscilan entre 0,1-0,2%. Se esperan mejores resultados en estos parámetros, al aplicar una mejor compactación durante el proceso de curado.

8. Conclusiones

8.1 Español

La finalidad inicial del proyecto era la preparación de piedra artificial a partir de residuos de vidrio, utilizando como aglomerante una resina polimérica, de forma que se mejoraran las propiedades de la piedra natural. Las conclusiones que podemos extraer de este trabajo fin de grado son:

1. En cuanto a la calidad y manipulación de las resinas hemos observado que la resina epóxica es mejor aglomerante y con ella se obtienen mejores resultados y condiciones de trabajo, que con la resina poliéster.
2. La granulometría del vidrio no será muy determinante en las propiedades mecánicas de la piedra, lo que permite elegir la granulometría en función del acabado.
3. Los resultados son repetitivos.
4. No se ha podido determinar la influencia de la presión y del vacío durante el curado de la probeta en los parámetros característicos de la pieza, debido al mal funcionamiento del Molde 3.
5. Se mejoran significativamente los resultados de la piedra natural (mármol blanco), pero no los conocidos de piedra aglomerada industrial. Aunque los valores son relativamente buenos, ya que superan con creces a las piedras naturales típicas empleadas en este tipo de producciones.
6. La coloración no influye en las propiedades mecánicas de la pieza.
7. Nuestra piedra artificial tiene una menor densidad aparente, y por tanto una mayor absorción de agua, que la piedra natural (mármol blanco) y piedra aglomerada industrial con datos conocidos. Esto podría mejorar aplicando

presión y vaciado a la masa, puesto que se conseguirá una mejor compactación.

8.2 English

The project's purpose was to make artificial stone from waste glass, using polymeric resin as binder, this way deliver improve the natural stones properties. The survey conclusions are:

1. The epoxy resin is better binder than polyester resin, because the results and work condition obtained are more accurate whit it.
2. The glass particle size doesn't not determining on the stone mechanical properties, allowing us to choose the particle size depending of the product appearance.
3. The results are repetitive.
4. It has not been possible determine the pressure and vacuum influence during the curing in the stone characteristic parameters, because the Mold 3 did not work correctly.
5. With our results we improve the white marble values, but there are not improved industrial agglomerated stone's results. Even so, our values are relatively good, because it improves the natural stone properties used in this type of production.
6. The color does not affect to the stone mechanical properties.
7. Our artificial stone has lower density and higher water absorption than natural stone (white marble) and agglomerated stone. This could be improved using pressure and vacuum during the curing, obtaining a better compaction,

9. Bibliografía

[1] Cristina León. PFC. Julio 2007. Estudio de la sustitución de los áridos por arenas procedentes del reciclado del vidrio para la formulación de mortero para albañilería.

[2] Donald R. Askeland. 1998. Ciencia e ingeniería de los materiales. International Thomson Editores.

[3] Fang-Chih Chang, Ming-Yu Lee, Shang-Lien Lo & Jyh-Dong Lin. 2010. Artificial aggregate made from waste stone sludge and waste silt. Journal of Environmental Management. Elsevier, pp. 2289-2294.

[4] Hou PC.2004. Reuse of waste glass powder for substitution of fine aggregate in the recycling of asphalt concrete. MD thesis. Department of Construction Engineering, National Yunlin University of Science & Technology.

[5] M. Galetakis, S. Raka. 2004. Utilization of limestone dust for artificial Stone production: an experimental approach. Minerals Engineering. Elsevier, pp. 355-357.

[6] Michael F. Ashby. 2009. Materials and the Environment, Eco-informe material choice. Elsevier Inc.

[7] Ming-yu Lee, Chun-Han, Fang-Chih Chang, Shang-Lien Lo, Jyh-Dong Lin, Ming-Yang Shan & Jeng-Ching Lee. 2008. Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. Cement & Concrete Composites. Elsevier, pp. 583-587.

[8] Sonia Marrero. Diciembre 2008. PFC. Hormigón elaborado con arena de vidrio.

[9] William F. Smith & Javad Hashemi. 2006. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Mc Graw Hill.

[10] Guía técnica del mármol blanco. Macael. Disponible URL: <http://macaelmarmol.com/wp-content/uploads/2014/10/GUIA-TECNICA-DEL-MARMOL-BLANCO-MACAEL.pdf>

[11] Manual técnico Dekton. Cosentino Disponible URL: <http://www.cosentino.es/wp-content/uploads/2014/09/dekton-manual-tecnico-ES-V6.pdf>

[12] Piedra aglomerada. Institut de promoció cerámica. Disponible en URL: http://www.ipc.org.es/guia_colocacion/info_tec_colocacion/los_materiales/piedra_art_resinas.html

[13] Tecnologías e instalaciones para la fabricación de BretonStone. Disponible en URL: http://www.breton.it/engineeredstone/es/product/Instalaciones_para_la_fabricaci%C3%B3n_de_la_piedra_compuesta/BRETONSTONE_BLOQUES

[14] Valores de densidad. Software Vaxa. Disponible en URL: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf

[15] Video proceso de fabricación industrial de piedra aglomerada. Silestone Cosentino. Disponible en URL: https://www.youtube.com/watch?v=yYgmZbcE_Y0

[16] Estudio de las diferentes resinas. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en URL: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/29959/07_TESIS.pdf?sequence=1

Normas

[17] EN 14618, Piedra aglomerada. Terminología y clasificación. Aenor Ediciones 2011.

[18] EN 14617-1, Métodos de ensayo para piedra aglomerada. Determinación de la densidad aparente y la absorción de agua. Aenor Ediciones 2005.

[19] EN 14617-2, Métodos de ensayo para piedra aglomerada. Determinación de la resistencia a flexión. Aenor Ediciones 2005.

[20] EN 14205, Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la dureza Knoop. Aenor Ediciones 2004.

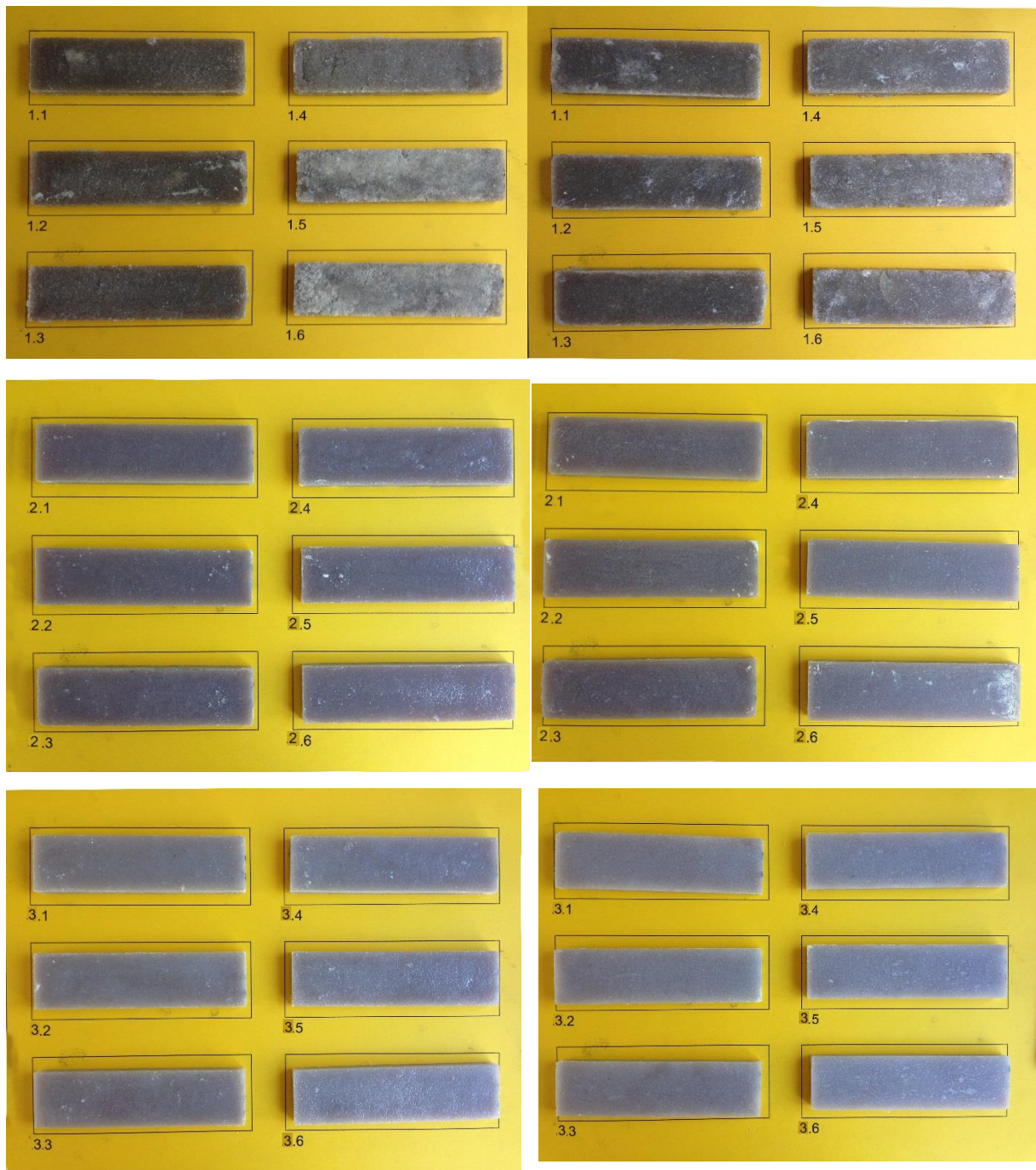
ANEXO I. Fotográfico

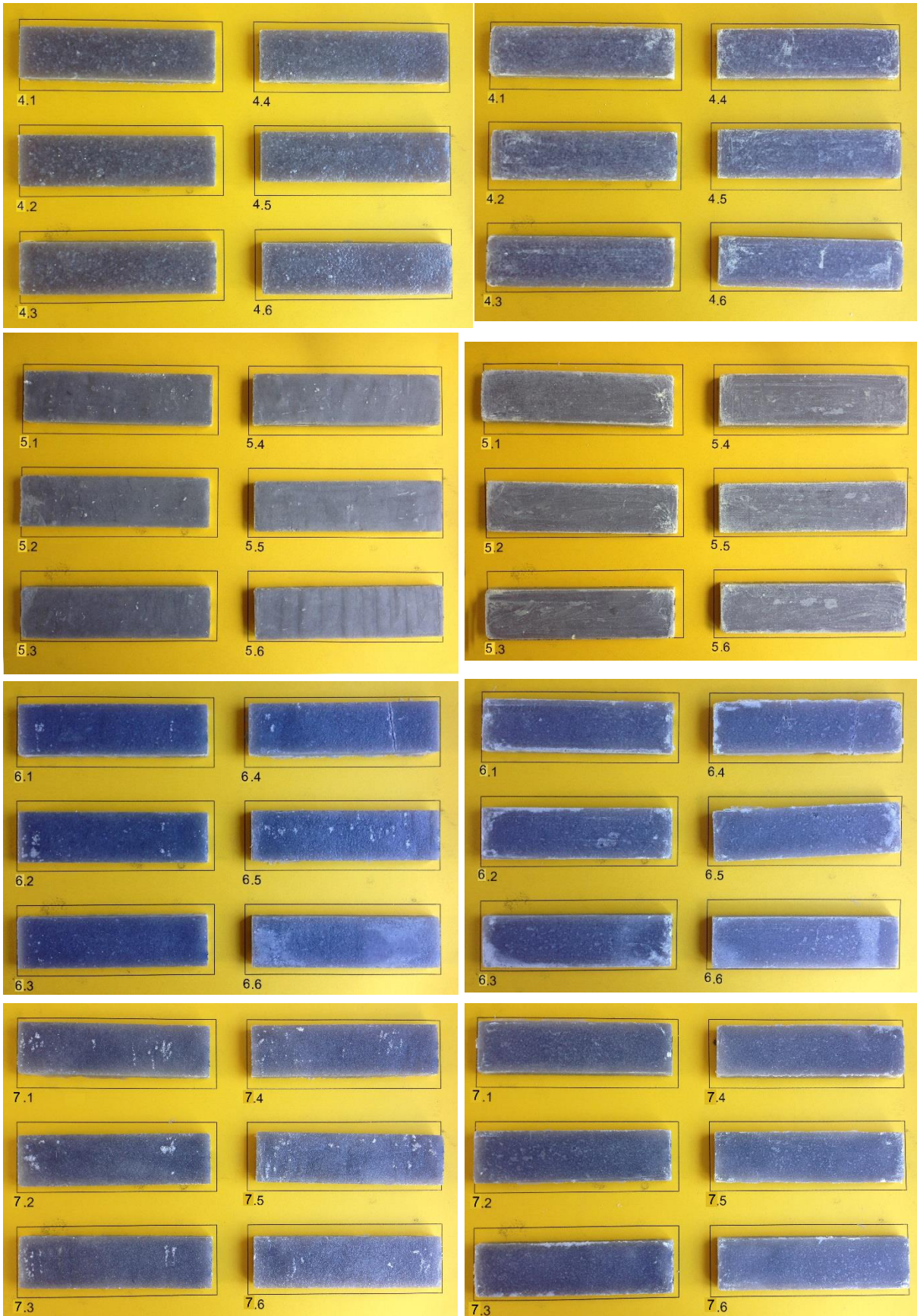
I.1. Preparación para ensayos

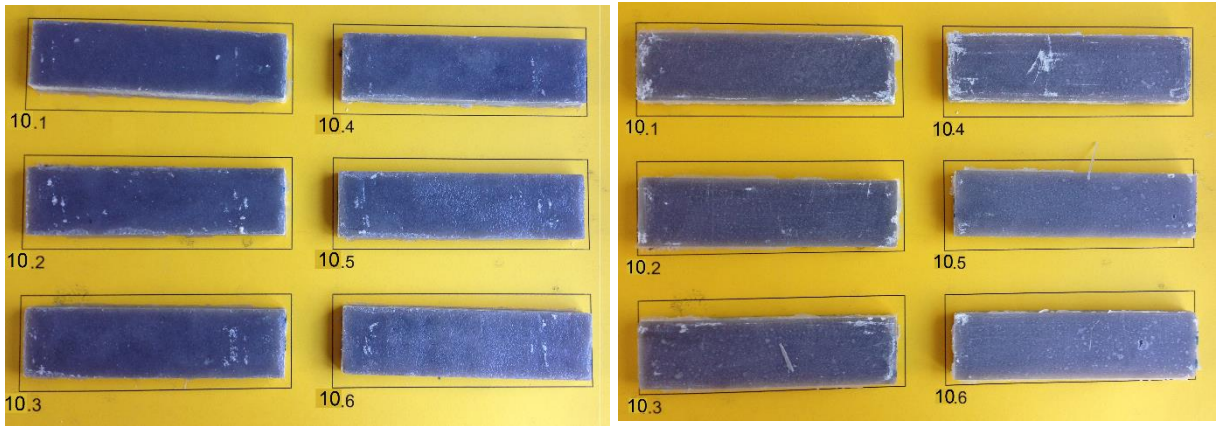
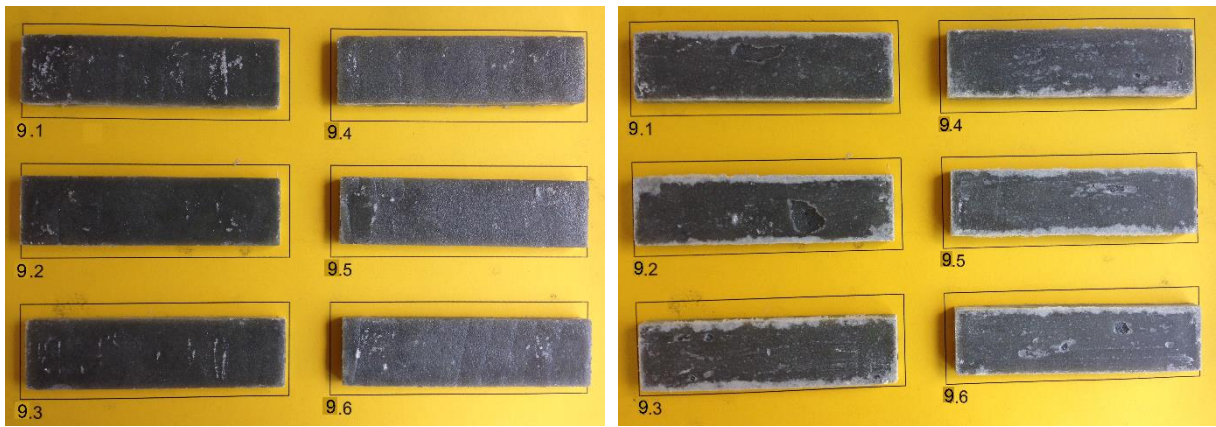
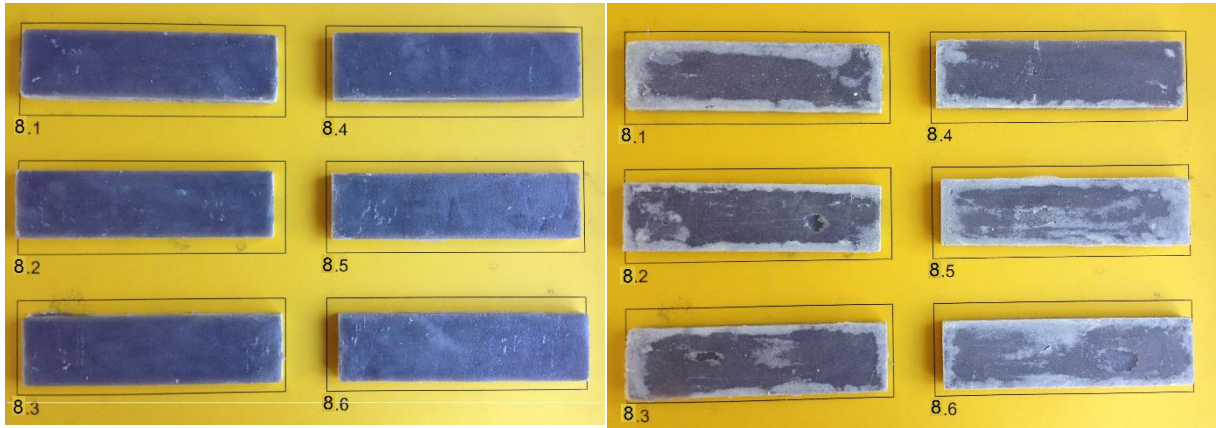
Probetas Intermedias antes del lijado

Cara superior

Cara inferior



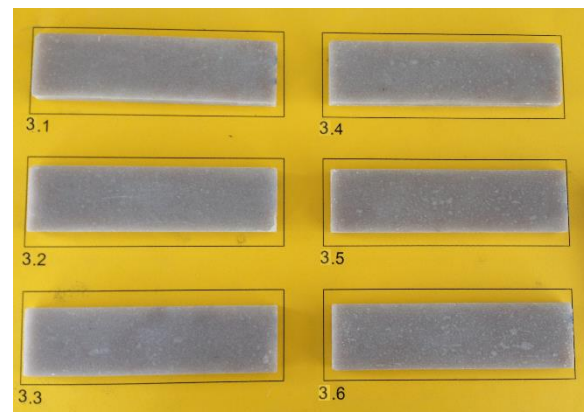
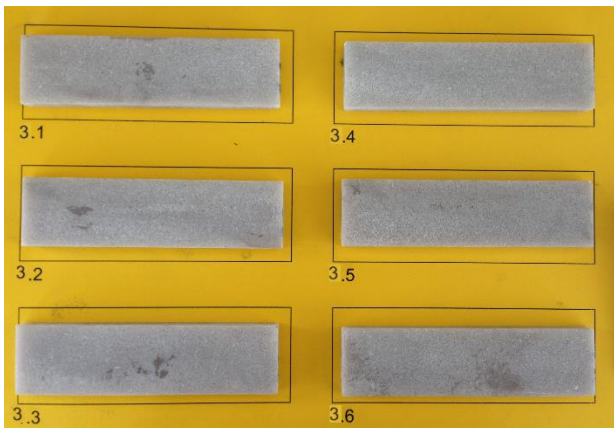
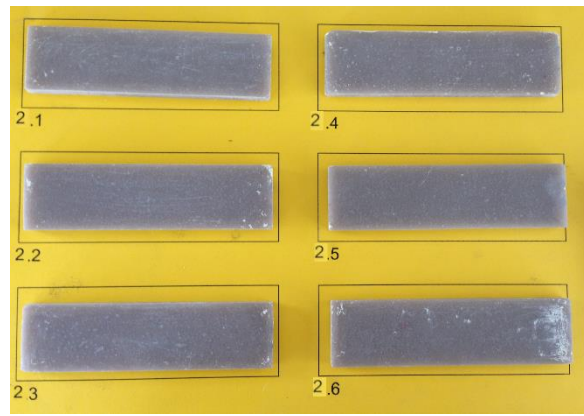
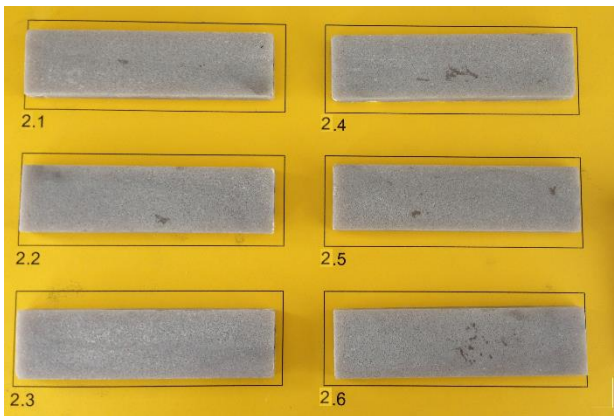
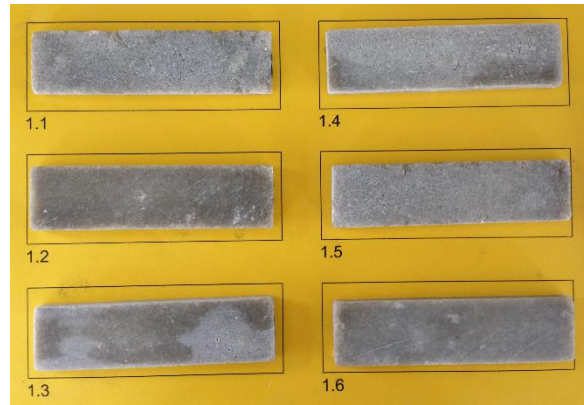
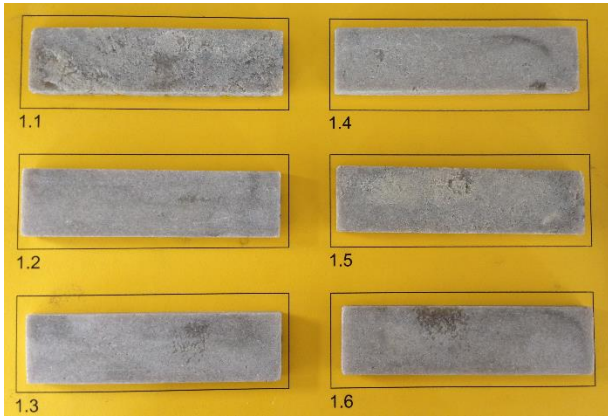


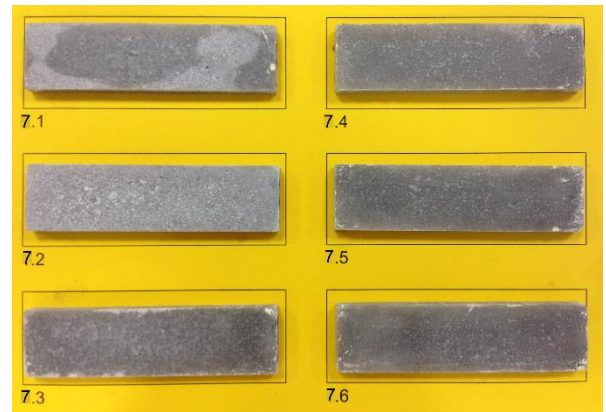
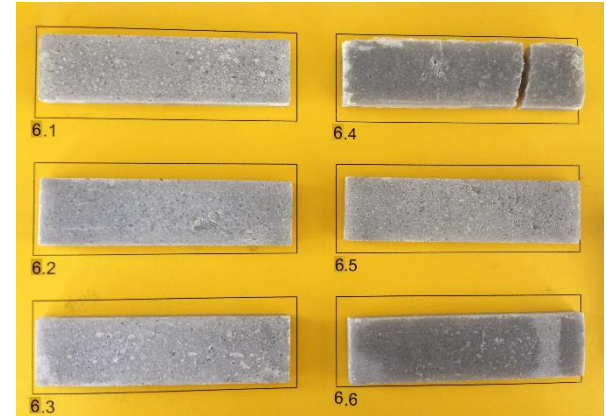
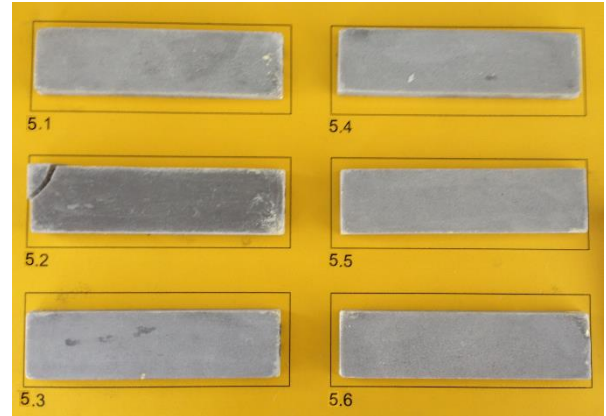
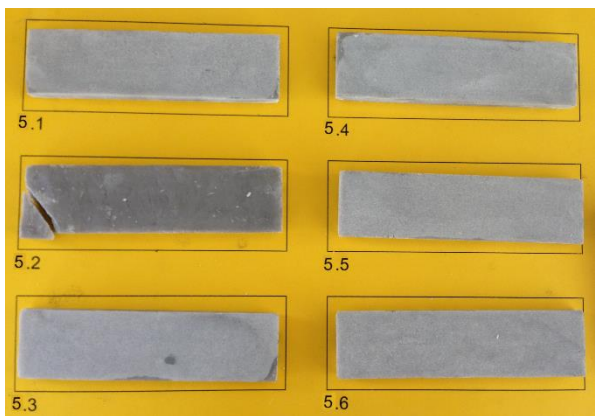
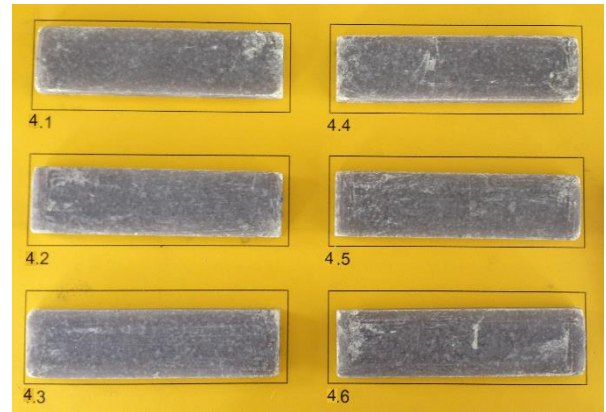
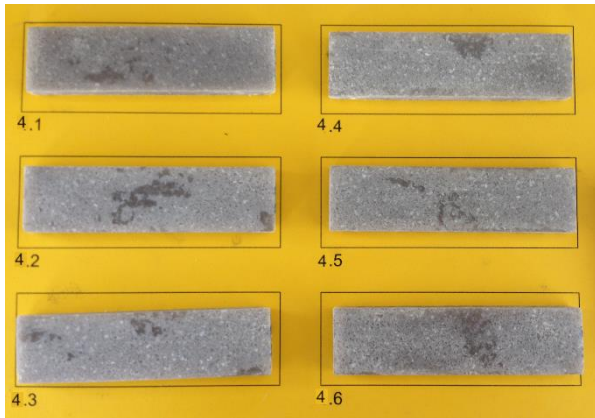


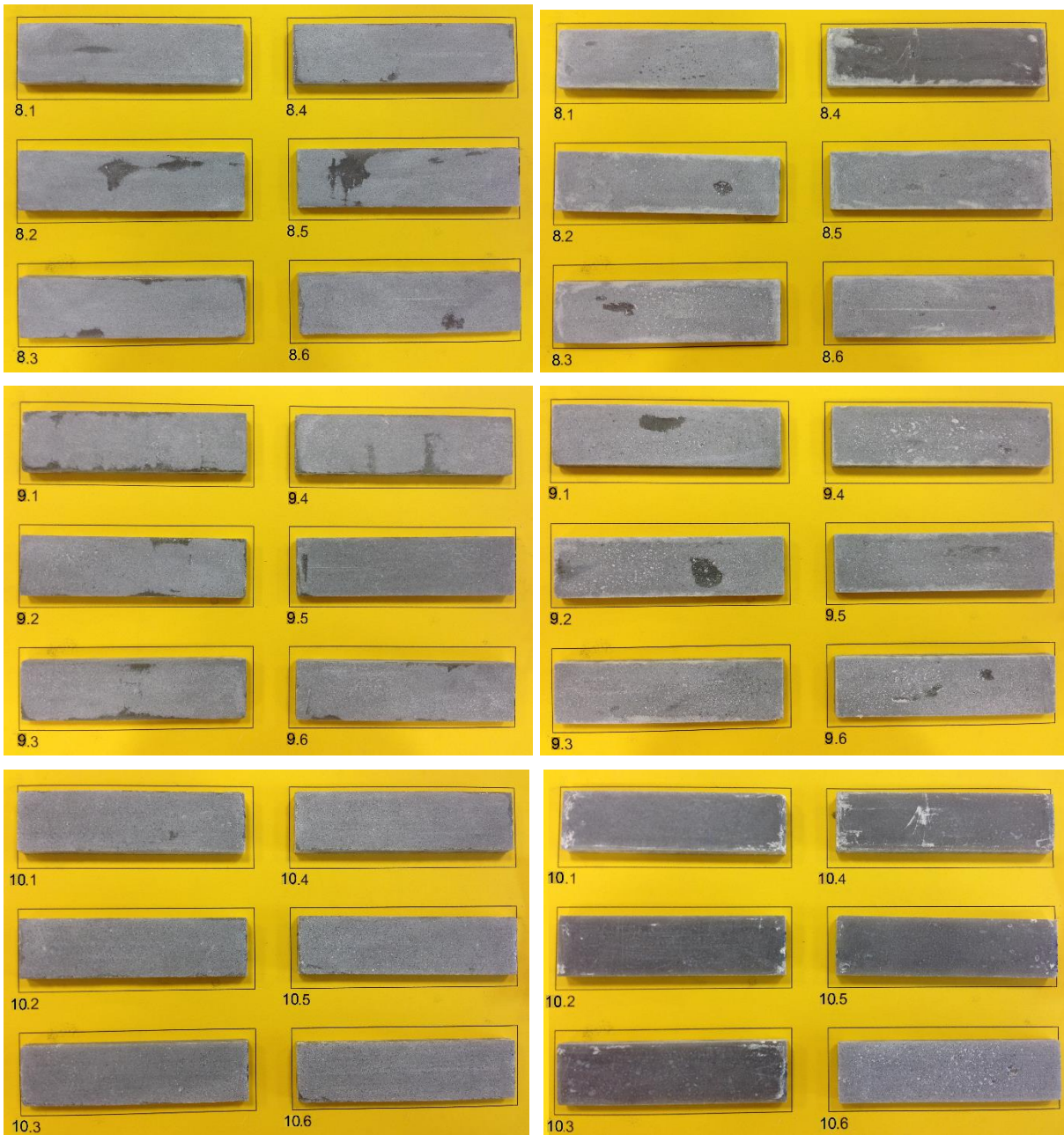
Probetas Intermedias después del lijado

Cara superior

Cara inferior



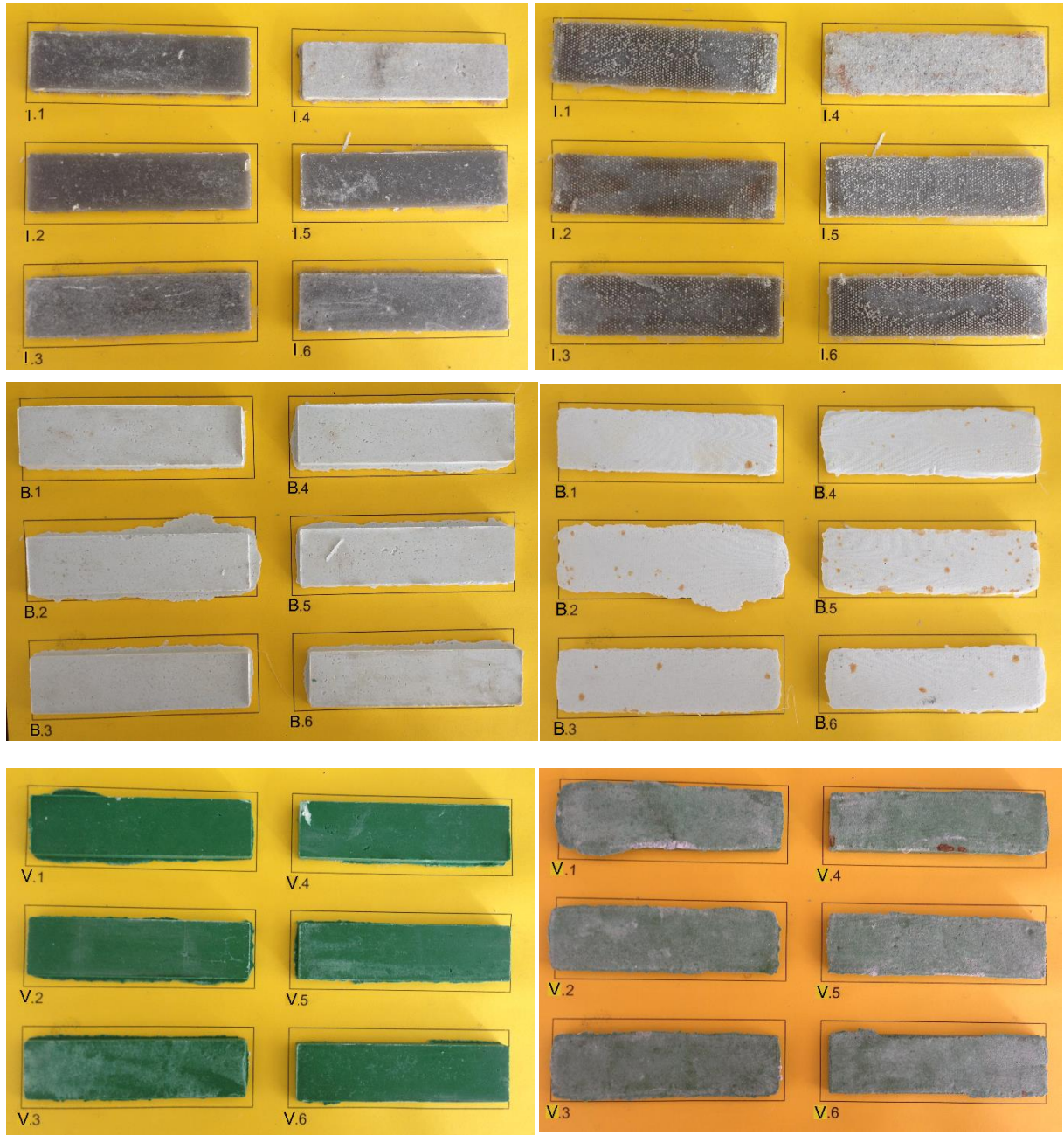




Probetas Finales antes del lijado

Cara superior

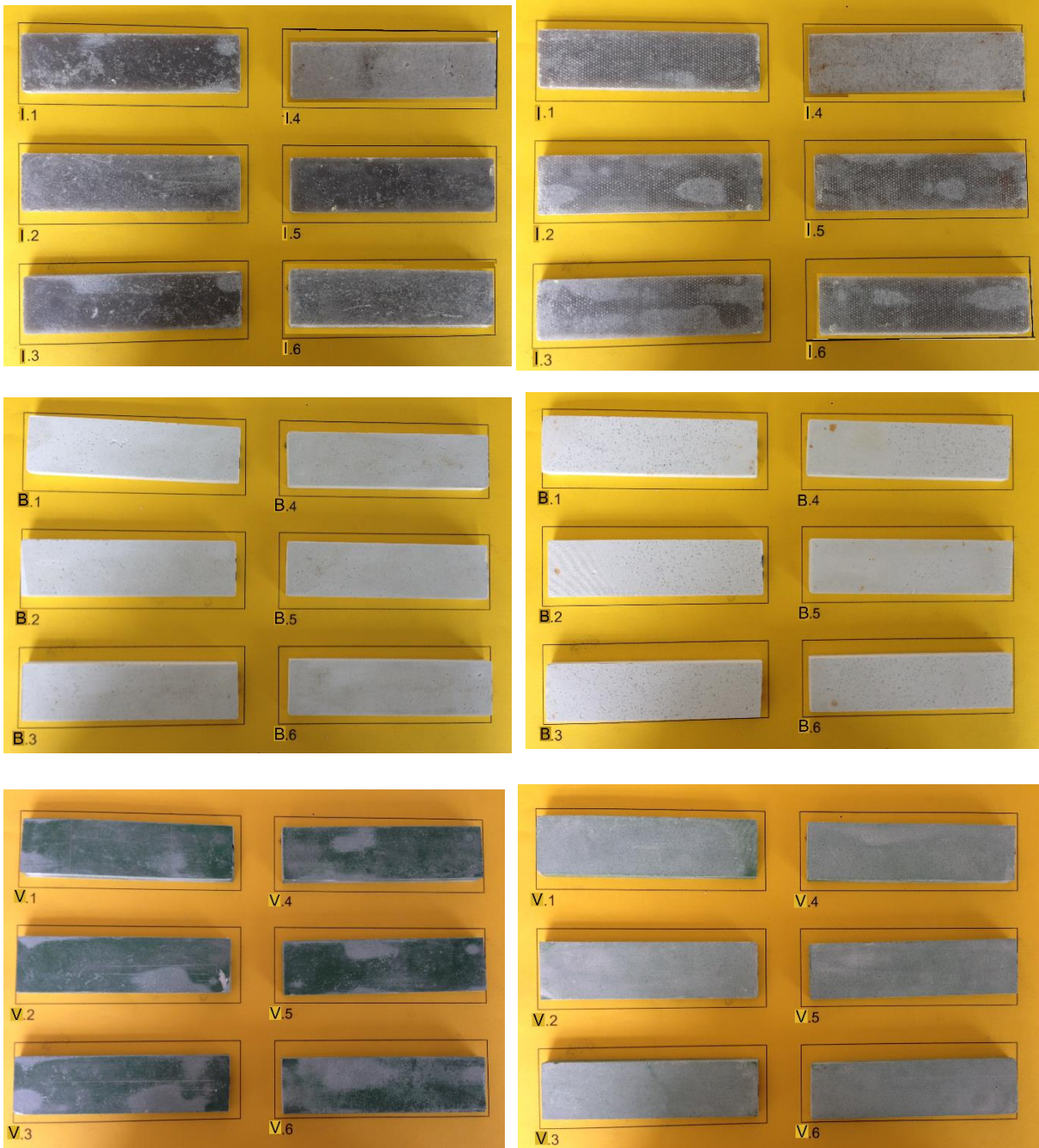
Cara Inferior



Probetas Finales después del lijado

Cara Superior

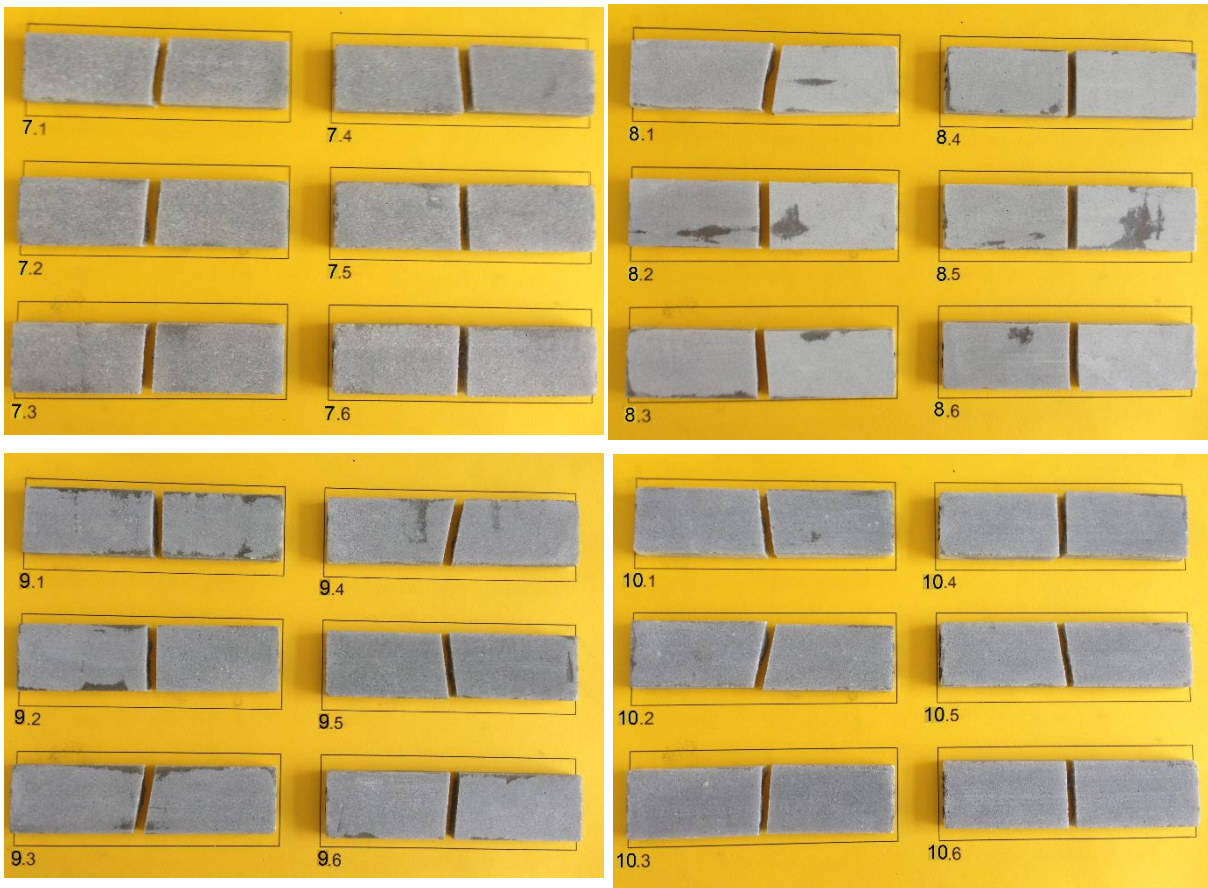
Cara inferior



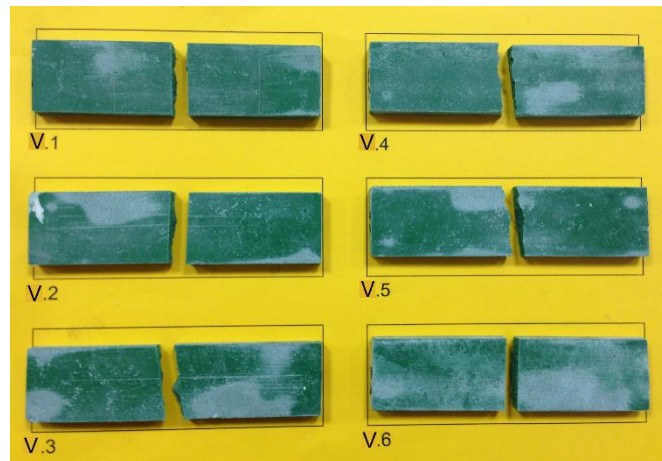
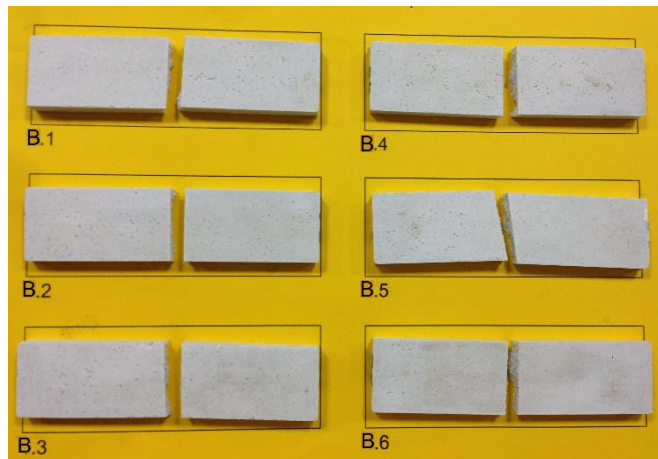
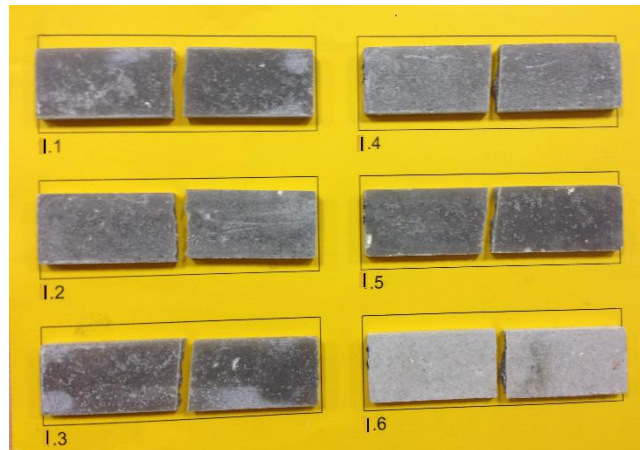
I.2. Ensayo a flexión

Probetas Intermedias

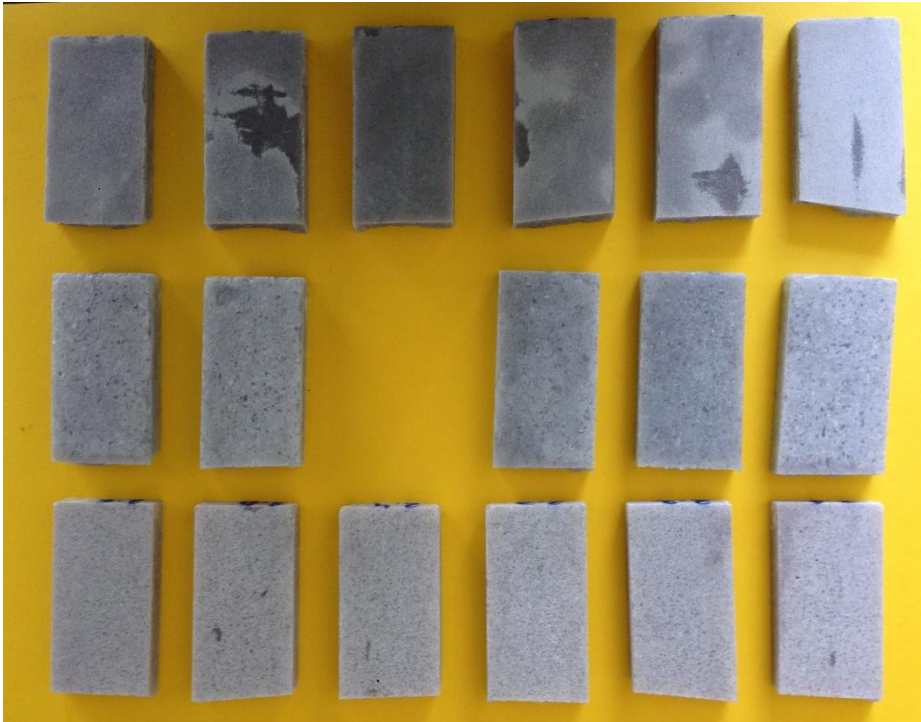




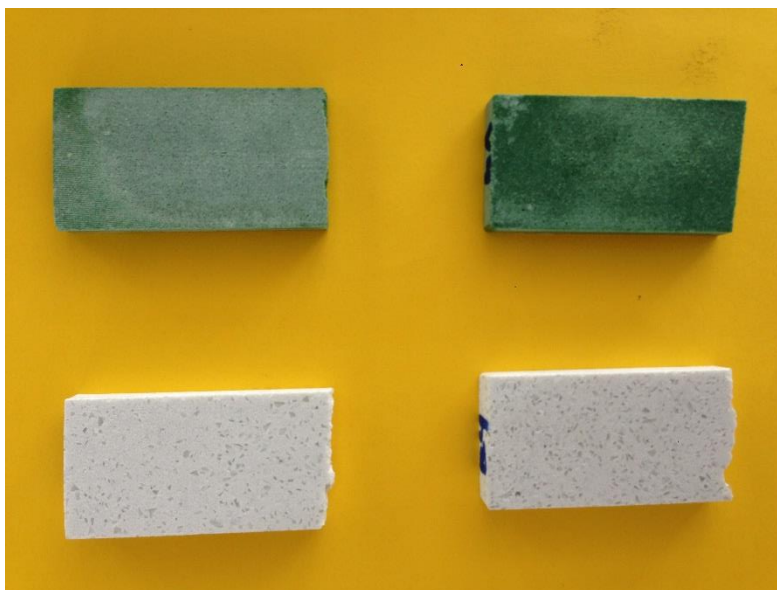
Probetas Finales



I.3. Ensayo de densidad aparente y absorción de agua

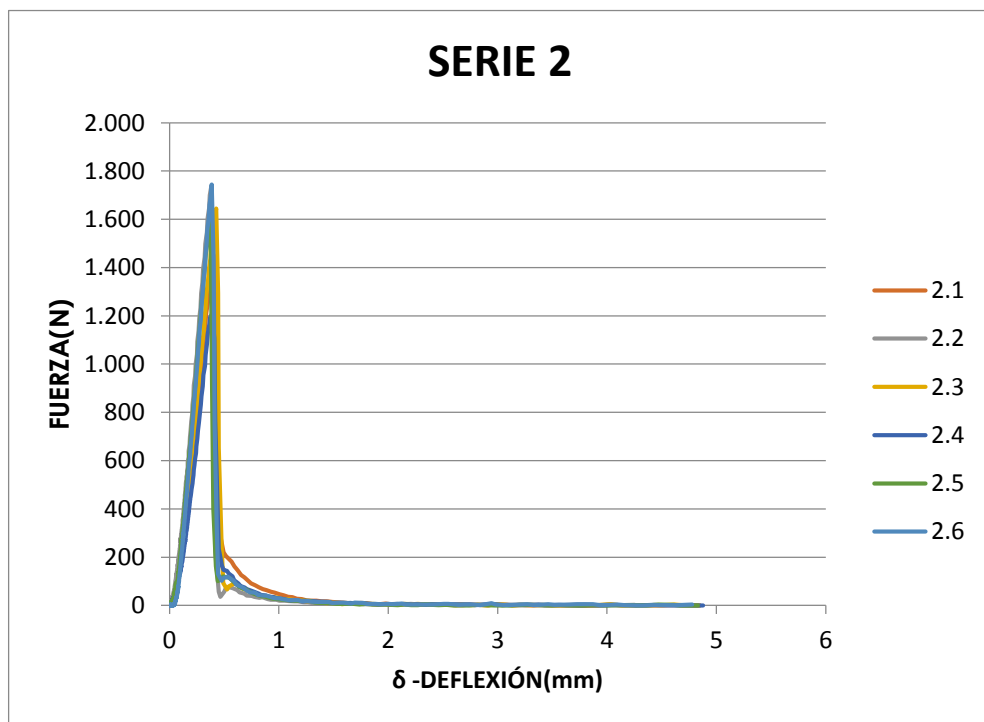
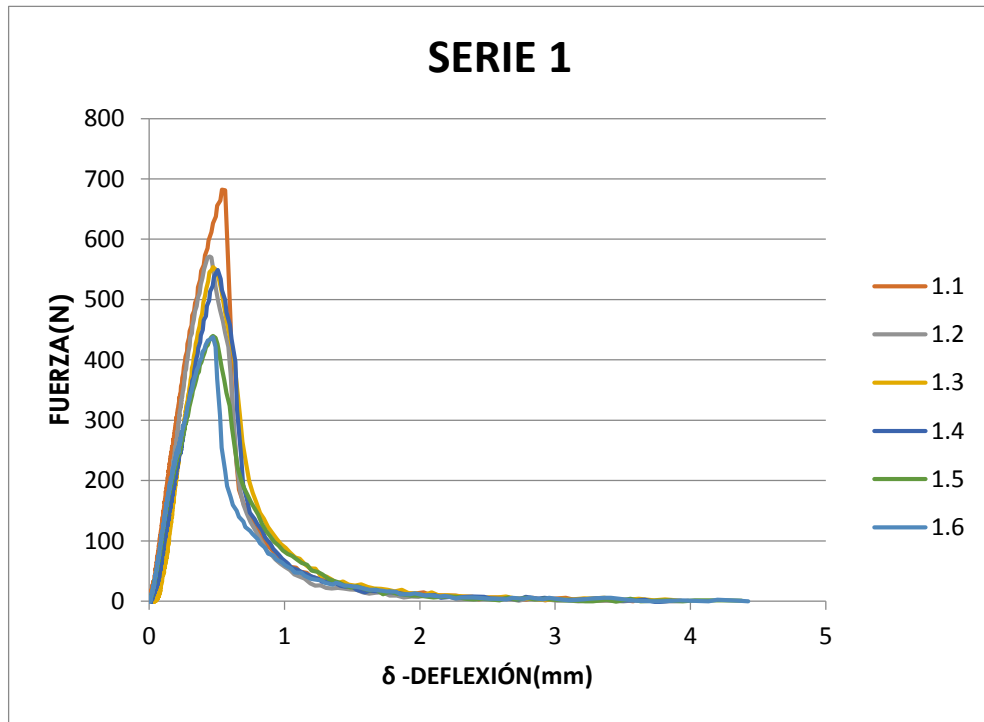


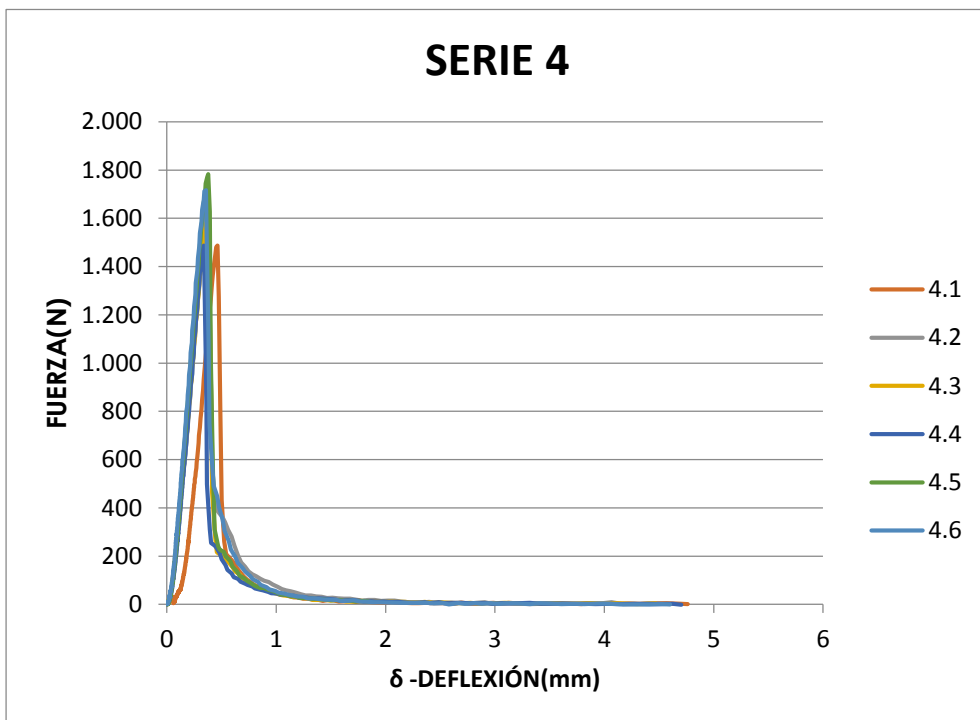
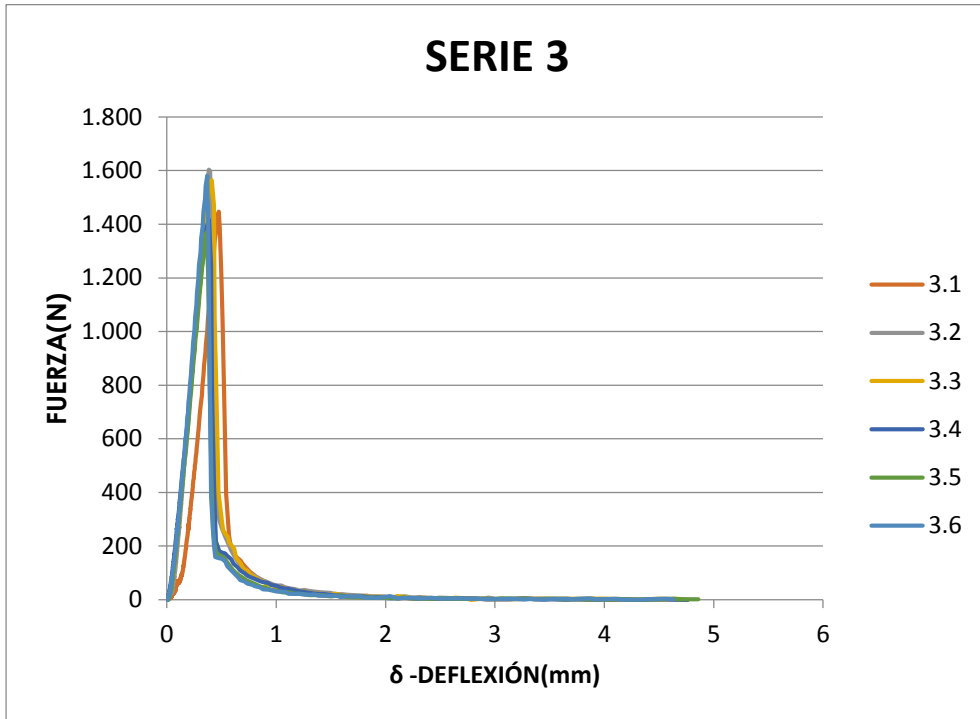
I.4. Ensayo de dureza Knoop

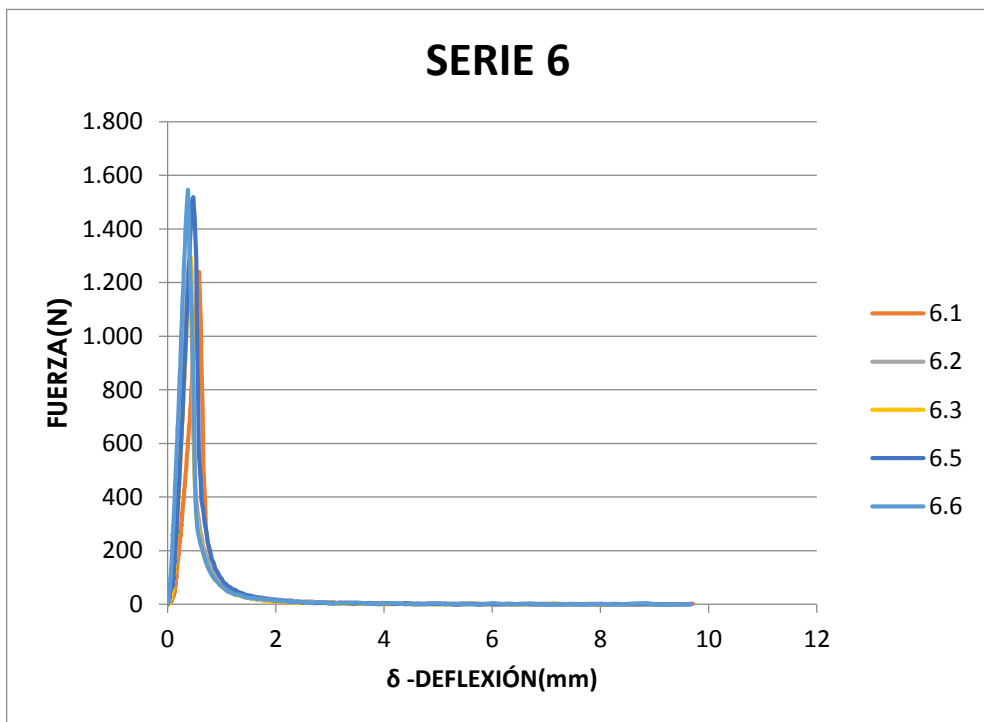
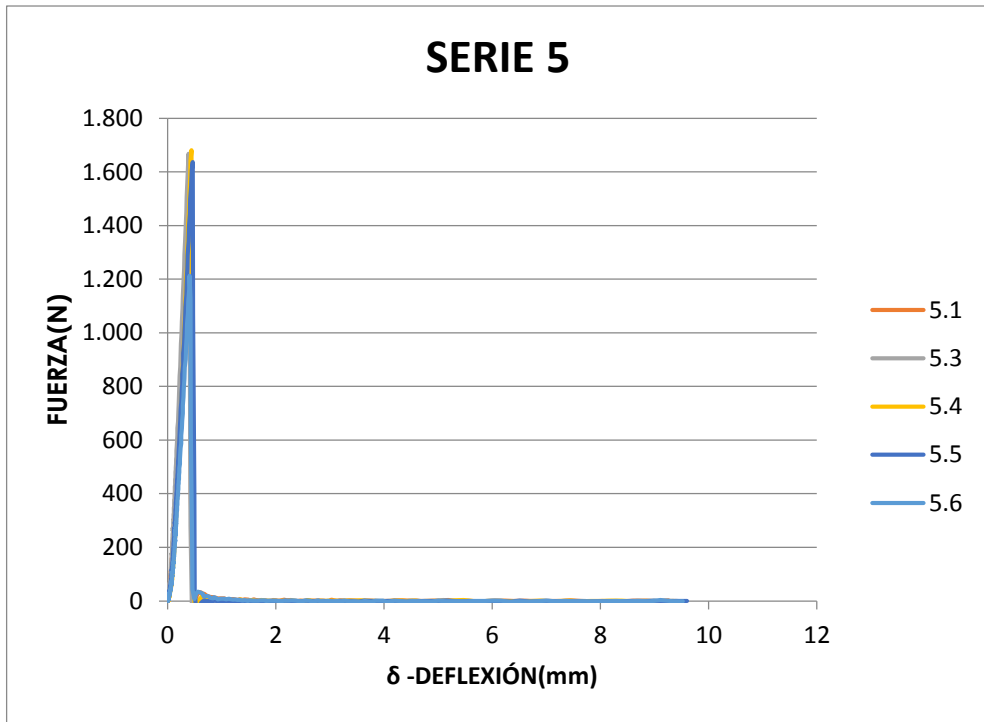


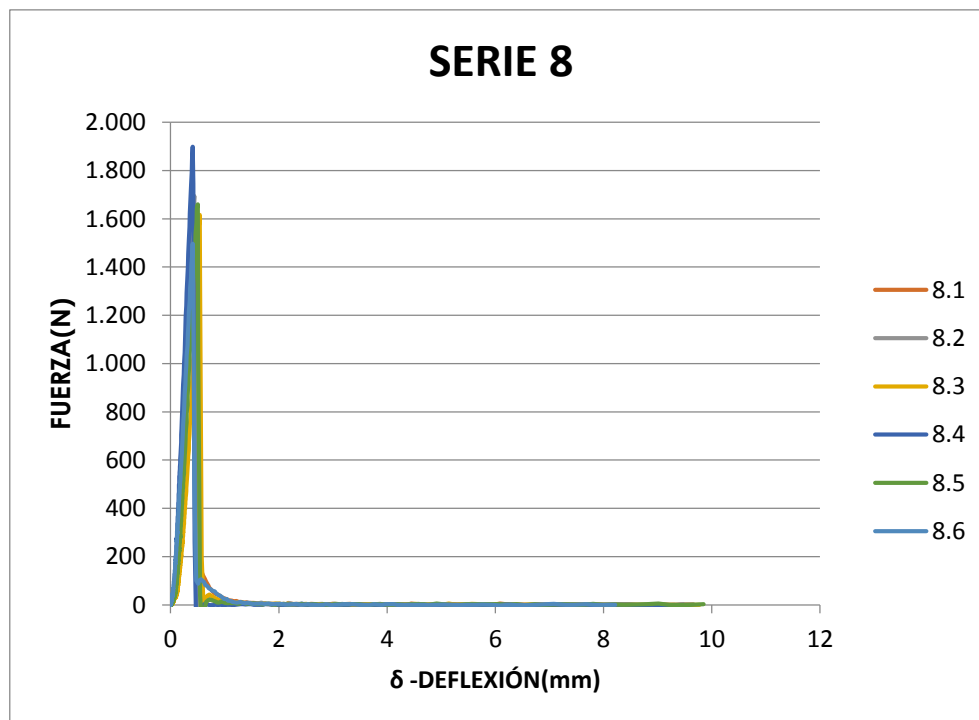
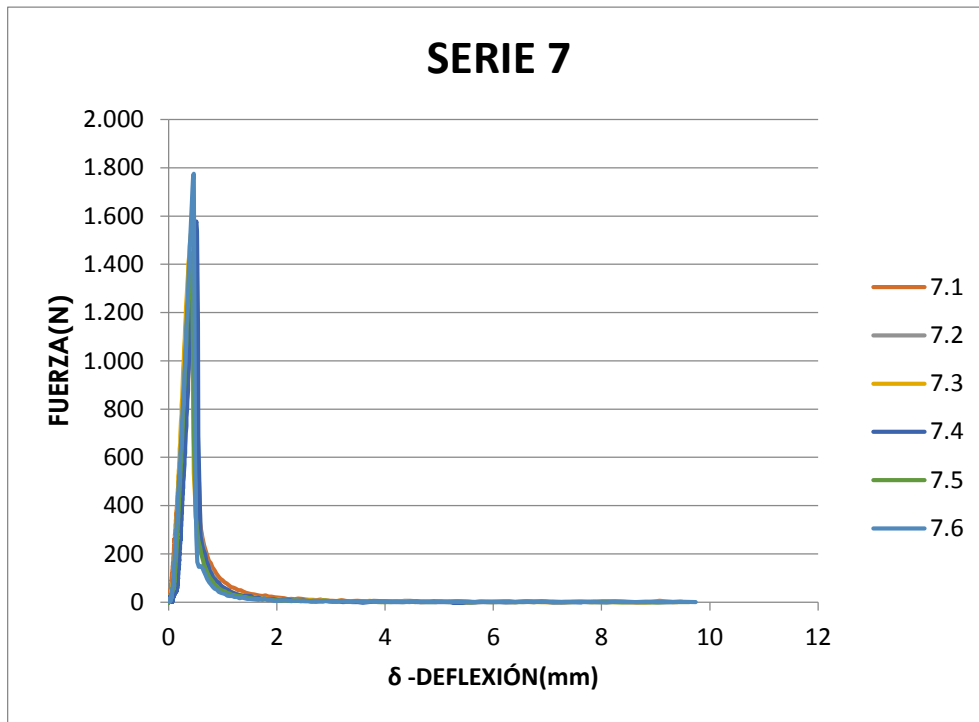
ANEXO II. Graficas ensayos a flexión.

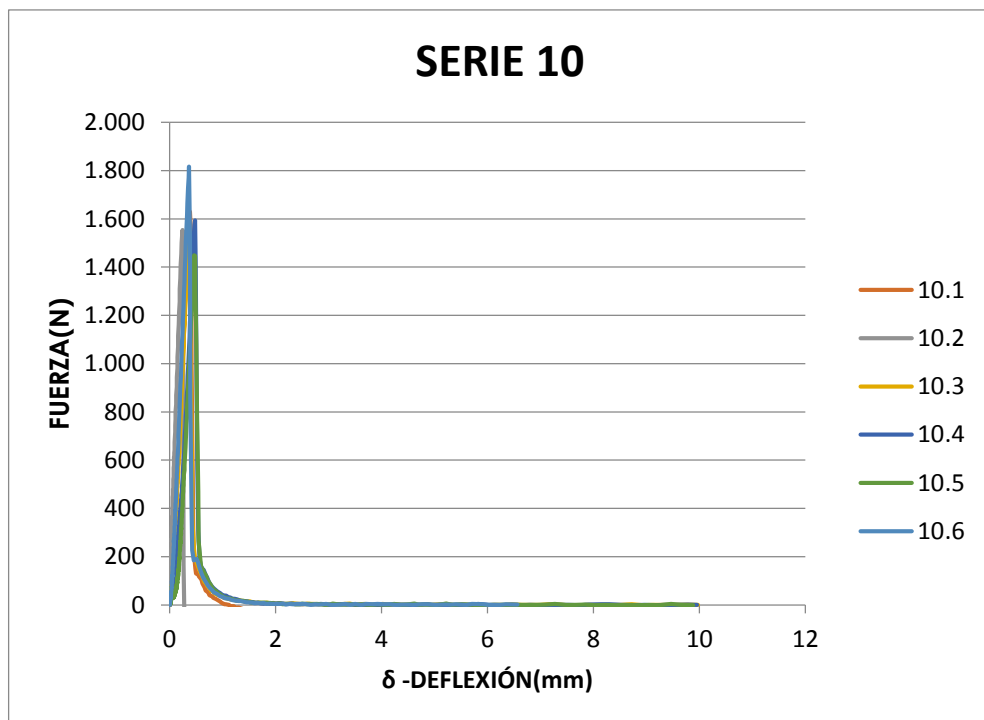
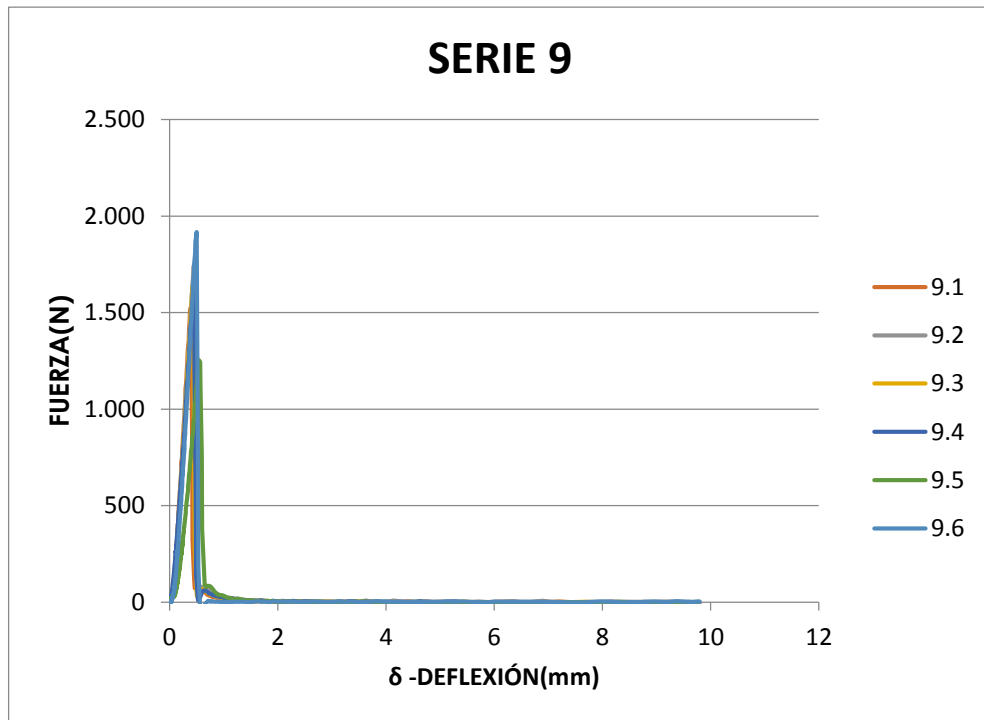
Probetas Intermedias



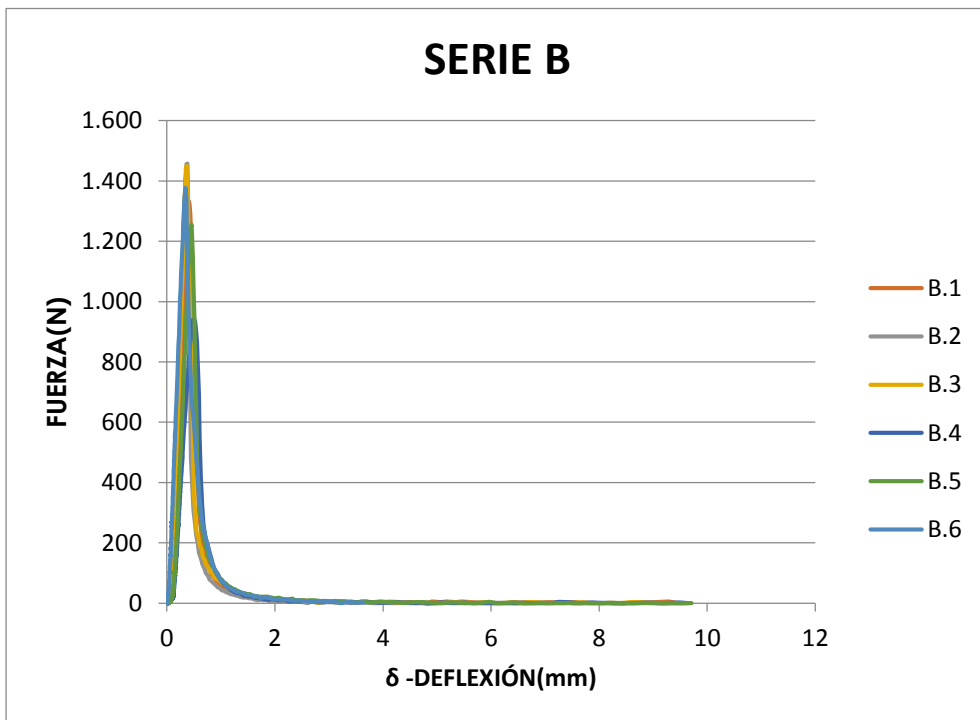
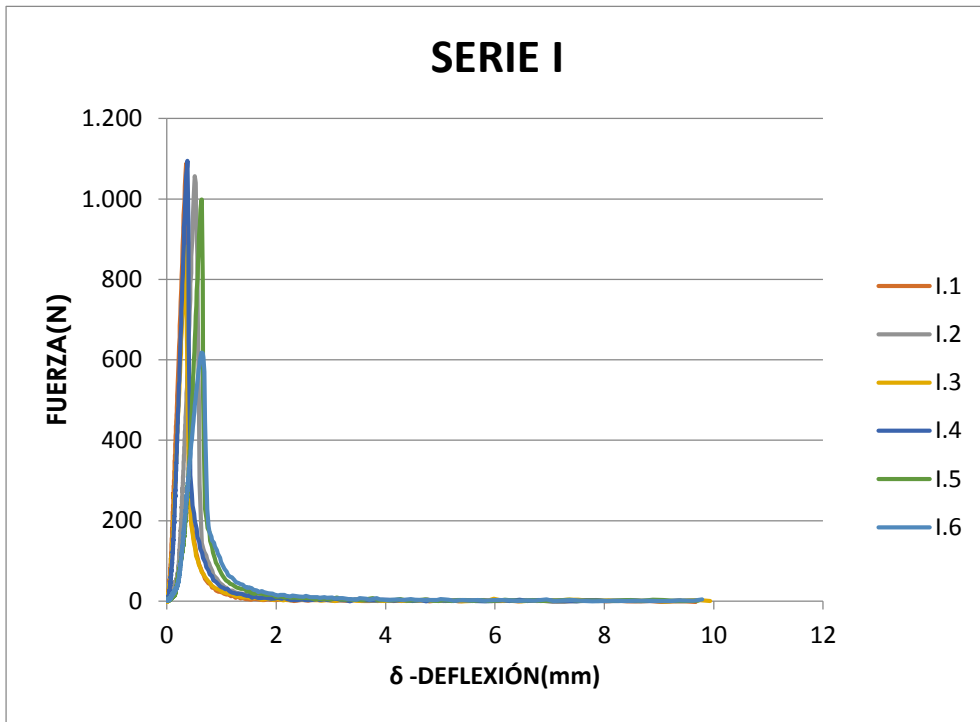


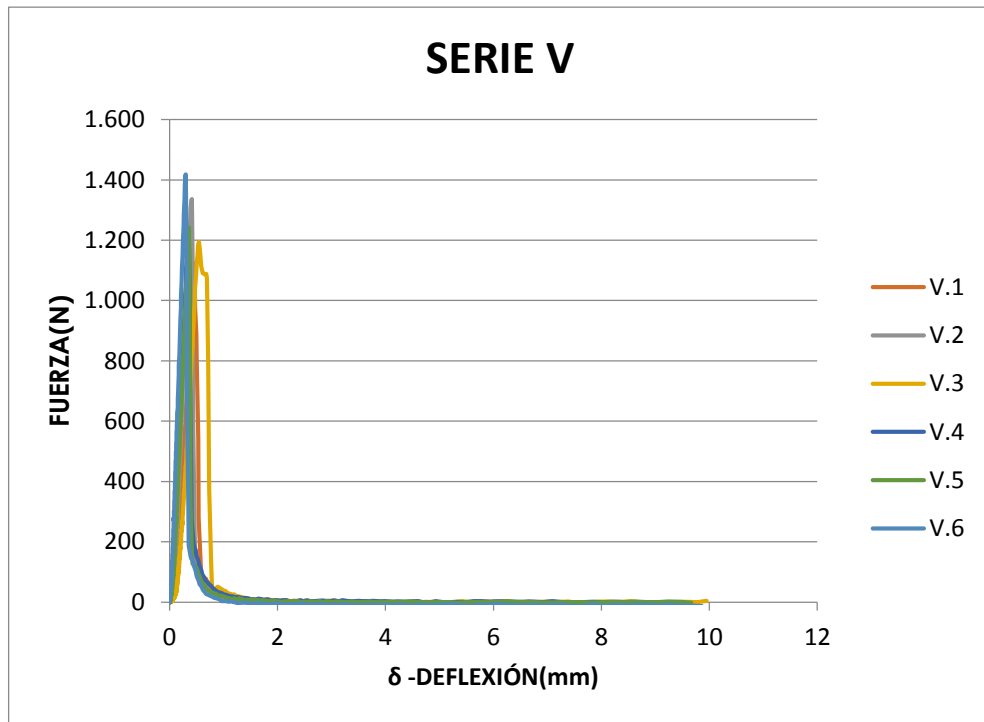






Probetas Finales





ANEXO III. Resultados por muestra

III.1. Ensayo resistencia a flexión

Probetas Intermedias

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
1.1	2720,102	17,350
1.2	3019,875	13,673
1.3	2596,045	13,799
1.4	2243,551	14,637
1.5	1895,073	11,430
1.6	2327,665	12,256
MEDIA	2467,052	13,858

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
2.1	5723,571	33,572
2.2	6168,063	39,123
2.3	4903,926	34,446
2.4	4859,301	28,329
2.5	6799,760	36,037
2.6	7496,572	39,721
MEDIA	5991,865	35,205

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
3.1	4954,367	30,882
3.2	5803,971	35,428
3.3	6130,134	35,695
3.4	6109,984	34,083
3.5	5863,554	31,983
3.6	5146,975	34,321
MEDIA	5668,164	33,732

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
4.1	5248,082	30,984
4.2	5536,326	33,189
4.3	5978,403	32,445
4.4	5988,146	31,069
4.5	6490,461	36,602
4.6	6236,448	34,221
MEDIA	5912,978	33,085

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
5.1	4474,317	32,381
5.3	6549,315	40,024
5.4	5186,220	35,640
5.5	5053,510	37,125
5.6	4454,472	27,498
MEDIA	5143,567	34,534

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
6.1	2466,945	25,302
6.2	5491,542	29,726
6.3	4946,148	28,286
6.5	4206,438	30,260
6.6	4899,723	29,393
MEDIA	4402,159	28,593

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
7.1	4696,864	28,033
7.2	4003,251	24,973
7.3	5294,201	29,769
7.4	5052,529	31,834
7.5	4635,205	27,893
7.6	3947,840	31,005
MEDIA	4604,982	28,918

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
8.1	6454,713	37,488
8.2	6197,895	38,606
8.3	3721,404	31,688
8.4	6114,779	38,498
8.5	5946,319	39,910
8.6	5956,592	35,321
MEDIA	5731,950	36,919

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
9.1	5666,239	31,759
9.2	6195,532	40,369
9.3	5612,674	36,047
9.4	5393,813	37,176
9.5	3253,642	26,438
9.6	4862,750	39,051
MEDIA	5164,108	35,140

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
10.1	5168,653	30,889
10.2	4137,518	27,508
10.3	4879,406	28,468
10.4	3331,788	30,633
10.5	4204,511	27,479
10.6	6713,626	38,132
MEDIA	4739,250	30,518

Probetas Finales

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
I.1	9478,578	38,283
I.2	6811,628	31,639
I.3	8160,263	30,790
I.4	8516,452	33,676
I.5	7702,796	35,160
I.6	3370,203	19,208
MEDIA	8133,943	33,909

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
B.1	6512,902	30,258
B.2	7362,357	34,164
B.3	4970,232	27,660
B.4	4232,743	22,023
B.5	5153,302	26,737
B.6	6046,826	29,601
MEDIA	6009,124	29,684

	Efl [Mpa]	Rfl [Mpa]
V.1	3762,708	22,483
V.2	6358,662	31,427
V.3	3592,255	24,134
V.4	5529,120	28,294
V.5	6406,867	31,205
V.6	6040,493	28,293
MEDIA	5281,684	27,640

III. 2. Ensayo de densidad aparente y absorción de agua

	Densidad aparente Mv [kg/m³]	Absorción de agua C [%]
2.1	1781,285	0,124
2.2	1932,233	0,143
2.3	1899,147	0,163
2.4	1913,809	0,117
2.5	1911,310	0,086
2.6	1887,095	0,090
MEDIA	1887,480	0,121

	Densidad aparente Mv [kg/m ³]	Absorción de agua C [%]
6.1	1826,779	0,392
6.2	1798,481	0,422
6.3	1810,889	0,424
6.4	0,000	0,000
6.5	1782,038	0,320
6.6	1799,523	0,299
MEDIA	1803,542	0,371

	Densidad aparente Mv [kg/m ³]	Absorción de agua C [%]
8.1	1804,023	0,409
8.2	1785,679	0,355
8.3	1828,638	0,280
8.4	1855,450	0,161
8.5	1896,326	0,357
8.6	1715,674	0,331
MEDIA	1814,298	0,315

III.3. Ensayo de dureza Knoop

SERIE B

MEDIDA	Dureza [HK]	Diagonal
1	39,4	134,22
2	20,3	187,05
3	27	162,19
4	29,1	156,24
5	11,2	251,05
6	32,1	148,77
7	57,3	111,35
8	55,1	113,54
9	41	131,71
10	30,2	153,27
11	27,2	161,49
12	24	171,97
13	29,2	155,88
14	20,5	186,03
15	24,1	171,65
16	29,5	155,2
17	20,4	186,73
18	18,8	194,38
19	26,4	163,88
20	23,4	174,3
MEDIA	29,31	163,545

SERIE V

MEDIDA	Dureza [HK]	Diagonal
1	39,5	134,15
2	27,7	160,27
3	31,4	150,36
4	44,6	126,24
5	29,3	155,79
6	37,5	137,67
7	29,2	156,06
8	16	210,49
9	38,3	136,17
10	51,6	117,41
11	49,7	119,56
12	19	193,2
13	53,3	115,46
14	29,9	159,23
15	26,5	163,59
16	35,5	141,52
17	29,8	154,26
18	29,7	154,66
19	41,1	131,49
20	29	156,63
MEDIA	34,43	148,7105

ANEXO IV. Valores comerciales

- Material: Mármol blanco Macael.
- Producto: Mármol blanco natural [9].

ENSAYO	RESULTADOS
Porosidad abierto (UNE-EN 1936:2007)	0.1-0.6 %
Densidad aparente (UNE-EN 1936:2007)	2500 - 2740kg/m ³
Absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 1925:1999)	0.098 - 0.509 g/m ² ·s0.5
Absorción de agua a presión atmosférica. (UNE-EN 13755:2002 y UNE-EN 13755/AC:2004)	0.1 - 0.2 %
Resistencia a la flexión bajo carga concentrada (UNE-EN 12372:2007)	12.1 - 14.2 MPa

- Material: Dekton.
- Distribuidor: Cosentino S.A.
- Producto: Piedra aglomerada artificial para interiores y exteriores, principalmente destinada a encimeras y baños [8].

ENSAYO	NORMA	DETERMINACIÓN	UD	Familia I	Familia II	Familia III
Resistencia a la flexión y carga de rotura	UNE EN ISO 10.545-4	Resistencia flexión media	N/mm ²	60	67	59
		Carga de rotura media	N	2.548	2.313	2.356
		Fuerza de rotura media	N	14.966	13.559	13.818
Absorción de agua, porosidad abierta y densidades	UNE EN ISO 10.545-3	Absorción de agua por ebullición	%	0	0,1	0,1
		Absorción de agua por vacío	%	0,1	0,1	0,1
		Porosidad abierta	%	0,2	0,2	0,2
		Densidad relativa aparente	g/cm ³	2,51	2,61	2,53
		Densidad aparente	g/cm ³	2,50	2,61	2,52

