



Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales:
Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín
reforzado con un textil no-tejido de fibras largas de lino y cáñamo

Trabajo de Fin de Máster

Autor:
Arq. Ana Llerena Encalada

Tutor:
Arq. PhD. Joan Lluís Zamora i Mestre

Co-Tutores:
Qca.PhD. Lucía Fernández Carrasco
Arq.PhD. Josep Claramunt Blanes

Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

Universitat Politècnica de Catalunya _ Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Máster Universitario en Tecnología de la Arquitectura (MUTA) _ Construcción e Innovación
Tecnológica

Autor: Arq. Ana Gabriela Llerena Encalada
Tutor: Arq. PhD Joan Lluís Zamora i Mestre
Co-tutores: Qca. PhD. Lucía Fernández Carrasco
Arq. PhD. Josep Claramunt Blanes

<http://mastersuniversitaris.upc.edu/tecnologiaarquitectura/>
e-mail: aglle3@hotmail.com



Agradecimientos

A Joan Lluís Zamora i Mestre, por su aporte y guía en este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a Lucía Fernández Carrasco y Josep Claramunt Blanes, por todos esos días en el laboratorio, sin su apoyo esto no hubiese sido posible, gracias en verdad!!!

A toda mi familia, quienes estuvieron apoyándome y motivándome cada día a pesar de la distancia. Y en especial a mi mejor amiga, mi hermana, gracias pulga. Los amo!!!

A todas esas personas quienes sin ser mi familia, se convirtieron en una. Rosana Saldaña, eres una hermana, gracias por estar ahí, sin ti todo habría sido más difícil y aburrido.

Índice

Resumen / Abstract

PRIMERA PARTE

Justificación

Objetivos / Objetivos Específicos

Hipótesis / Alcance / Metodología

1.	Antecedentes Históricos	01
1.1.	Compuestos cementíceos (hormigón, mortero y pasta de cemento): introducción y definición	
1.2.	Breve reseña histórica del cemento y el hormigón. Importancia como material de construcción	
1.3.	Necesidad de refuerzo: hormigón armado	
1.4.	Búsqueda de nuevas alternativas para el refuerzo de compuestos cementíceos.	
1.5.	Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales.	
2.	Estado del Arte Académico: VFRCC	21
2.1.	Introducción	
2.2.	Definición de compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales.	
2.3.	Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales	
2.4.	Durabilidad de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales	
2.5.	Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales	
3.	Estado del Arte Industrial	55
3.1.	Paneles existentes en el mercado actual español.	
3.2.	Normativa actual de fabricación	
3.3.	Normativa de manipulación de los fibrocementos	

SEGUNDA PARTE

4.	Materiales y Métodos	67
4.1.	Ensayos de Resistencia Mecánica	
4.2.	Definición de la Campaña Experimental	
4.3.	Selección de Ensayos de Caracterización según la Norma UNE EN 12467:2013	
4.4.	Planning de Ensayos	
5.	Campaña Experimental	95
5.1.	Generalidades	
5.2.	Elaboración de los paneles	
5.3.	Ensayos de caracterización del VFRCC	
6.	Discusión de datos de la campaña experimental	181
6.1.	Resumen de discusión de datos	
7.	Conclusiones Finales	197
8.	Bibliografía	201
9.	Anexos	



introducción

introducción

1. antecedentes

2. estado del arte

3. e. a. industrial

4. mat./métodos

5. campaña expertl.

6. discusión datos

7. conclusiones

Resumen

Hoy en día todos los materiales de construcción están en continua investigación, en busca de mejorar sus prestaciones.

Sin duda el cemento y los materiales de construcción generados a partir de él, han estado en continua evolución. Una de ellas se dio hace pocas décadas, cuando en un afán por sustituir las fibras dañinas de asbesto en los fibrocementos se empezó la búsqueda de nuevas alternativas.

Es así como se da la inserción de las fibras de acero, fibras de vidrio resistentes a los álcalis, fibras de PVA, fibras de carbono, etc. Demostrando que mejoraban el rendimiento del material en cuanto a ductilidad, resistencia a flexión, resistencia a tracción, dureza, resistencia al impacto y capacidad de absorción de energía.

Sin embargo, hoy en día existen nuevos criterios a ser considerados, tales como: sostenibilidad, disponibilidad en el medio, reciclabilidad, bajo consumo de energía y poca emisión de CO₂ en los procesos de producción, entre otros. Todos ellos enfocados a obtener productos de bajo impacto y amigables con el medio ambiente.

En respuesta a ello las fibras vegetales son económicas, abundantes (en la mayoría del planeta) y provienen de fuentes renovables, constituyendo una muy buena opción para reforzar compuestos cementíceos.

Pese a muchas investigaciones realizadas, las fibras vegetales aún no se logran incorporar plenamente en los fibrocementos disponibles en el mercado, debido a su poca durabilidad en el compuesto. Las fibras al estar en un medio alcalino como

el cemento se deterioran y pierden su capacidad de refuerzo, llegando en algunos casos a anularse por completo.

Existen dos maneras actuar para mejorar la durabilidad de los compuestos: en su matriz y/o en su refuerzo (fibras vegetales).

En este Trabajo de Fin de Máster, se plantea la elaboración de paneles para fachada, realizados con cemento portland blanco y reforzados con un textil no-tejido de fibras de lino y cáñamo, que permita incorporar el mayor volumen de fibras largas sin que estas se enreden. Se pretende mejorar la durabilidad del compuesto a través de: reducir la alcalinidad de la matriz con el uso de una adición puzolánica, como el metacaolín; y mejorar el refuerzo mediante un tratamiento previo de "lavado y cornificación", para optimar la adherencia fibra-matriz. Con este esquema, se elaboran 6 paneles blancos y 1 panel amarillo, los cuales son sometidos a ensayos de durabilidad y caracterización, basado en la normativa vigente (UNE EN 12467:2013).

Palabras clave: Fibrocemento, Cemento, Fibras Vegetales, Lino, Cáñamo, Metacaolín, No-tejido

Keywords: Fibercement, Cement, Vegetal Fiber, Flax, Hemp, Metakaolin, Non-woven

Abstract

Today the materials of construction are in continuous research, seeking to improve their performance.

Certainly the cement and building materials generated from it, have been in continuous evolution. One of them occurred a few decades ago, when in an effort to replace harmful asbestos fibers in the fiber-cements started seeking new alternatives.

This is one of the reason that the insertion of steel fibers, glass fibers resistant to alkali, PVA fibers, carbon fibers, etc. have been taking place. It was proved that these types of materials have enhance the performance in terms of ductility, flexural strength, tensile strength, toughness, impact resistance and energy absorption capacity.

However, nowadays there is a new criteria to be considered, such as sustainability, availability in the environment, recyclability, low power consumption and low CO₂ emissions in the processes of production, among others. All of them focused on obtaining products with low impact and eco-friendly.

In response vegetable fibers are inexpensive, abundant (in the major part of the planet) and come from renewable sources, constituting a very good option to reinforcement the cement composites.

In spite of many investigations, the vegetal fibers still have not been completely incorporated into the fiber-cements in the market, for its lack of durability. Due to the alkalinity of the matrix, the fibers lose their reinforcement ability and in some cases they lose all their capacity.

There are two ways to improve the durability of the composites: in the matrix and/or in their reinforcement (vegetal fibers).

In this Final Master's Project, this research is based of the development of façade panels, made with white portland cement and reinforcement with a non-woven of flax and hemp, so these give us the hability of include major volume of long fibers without tangling. Aims to improve the durability of the composite by: reducing alkalinity of the matrix with the addition of a pozzolanic, as the metakaolin; and improve the reinforcement by a pretreatment of "washing and hornification", to optimize the fiber-matrix adhesion.

In this Project were manufactured 6 white panels and 1 yellow panel, which are subjected to durability testing and characterization, based on current regulations (UNE EN 12467:2013).

PRIMERA PARTE

Introducción

Justificación

La mayoría de países en Latinoamérica poseen un alto déficit habitacional. Tan solo con visitar las afueras de las principales ciudades, podemos observar el alto crecimiento urbano con viviendas en condiciones precarias. La mayoría de ellas carecen de recursos básicos (agua potable, red de saneamiento, luz eléctrica, etc.). Ecuador por ejemplo, posee un déficit de 1'200.000 unidades de vivienda según el último Censo realizado en el año 2010 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).

Pese a los grandes esfuerzos que realiza el gobierno, no se logra satisfacer la alta demanda de vivienda para personas de bajos recursos, debido en parte, al lento sistema de construcción y falta de pre-fabricación.

A manera de ejemplo se cita uno de los proyectos más grandes de vivienda social de Quito. Ciudad Bicentenario[1], es el Plan de Vivienda que promueve el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito a través de la Empresa Pública Metropolitana de Hábitat y Vivienda (EPMHV). En este Plan se tiene programada la construcción de 1848 unidades habitacionales, las cuales se entregarían en el mes de marzo del presente año [2].

Se trata de un proyecto que se desarrolla de manera horizontal, con casas unifamiliares adosadas (de uno y dos plantas) y departamentos sencillos o dúplex (en edificios de 4 o 5 plantas). La etapa inicial la realizaron en estructura de hormigón armado in situ y paredes de bloque de hormigón (enlucidas y pintadas) [3].

Si bien no es un tema a tratar en este trabajo, podemos observar la utilización de sistemas tradicionales de construcción, con tiempos de ejecución bastante largos y poco desarrollo de la sustentabilidad del mismo. La acumulación de tiempo "mal aprovechado", simplemente se ve reflejada en una recuperación tardía de la inversión, y por ende una demora para suplir el déficit habitacional actual [4].

Agopyan, Swamy, Savastano [5]-[7], entre otros autores, hacen referencia a la rápida urbanización en Latinoamérica encontrando que las fibras vegetales pueden ser una solución posible al déficit habitacional, gracias a su bajo costo y a su abundancia sin ser explotada a su máxima capacidad.

Con este preámbulo, el trabajo de fin de máster pretende contribuir a la búsqueda de alternativas constructivas actuales,

1 Vegetable fibers reinforced cement composites



Imagen 1 _ Proyecto Ciudad Bicentenario – Quito, Ecuador [1]

Imagen 2 _ Una de las tipologías de vivienda, proyecto Ciudad Bicentenario [1]

donde el costo ecológico y económico, se vean reducidos, sin afectar la calidad arquitectónica-constructiva. De igual manera se busca promover el uso de materias primas locales, con un proceso sencillo de fabricación y un reducido tiempo de transporte contribuyendo a la menor emisión de CO₂.

Este trabajo de fin de máster plantea la investigación de un Compuesto Cementíceo Reforzado con Fibras Vegetales (VFRCC)¹. Se pretende rescatar todos los valores que las fibras nos brindan como material e introducirlas en una matriz frágil como es el cemento. Este último (por sí solo) carece de la resistencia mecánica suficiente para soportar esfuerzos flectores como los que está sometido un elemento delgado de fachada.

Es necesario comentar que esta tesina es el preámbulo para una tesis doctoral, donde se investigará más a fondo el uso de este compuesto dentro de un país en vía de desarrollo (Ecuador), con el uso de fibras locales. Además de contribuir con un material sustentable, se pretende aportar un nuevo sistema de construcción en el que prime la prefabricación.

Introducción

Objetivos

El objetivo general de este trabajo de fin de máster es alcanzar los conocimientos necesarios acerca de los Compuestos Cementíceos Reforzados con Fibras Vegetales (VFRCC) para plantear las bases de una futura tesis doctoral, en la que se pretende proponer mejoras al material e impulsar su uso en un país en vías de desarrollo como Ecuador (país natal).

Este objetivo se pretende lograr mediante una primera fase de investigación teórica acerca del material, y una segunda fase experimental, donde se realizará un panel compuesto por una matriz cementícea reforzado con fibras vegetales, y así lograr un primer acercamiento a su fabricación y ensayos de aceptación según la normativa vigente.

Objetivos Específicos

- Examinar los tipos fibras y sus posibles formatos de aplicación dentro de un compuesto de matriz cementícea. Encontrar, las ventajas al usar uno u otro formato.
- Identificar las ventajas y desventajas del uso de fibras vegetales como material.
- Encontrar las características comunes que poseen los compuestos formados por matrices cementíceas (morteros o pastas) reforzados con fibras vegetales.
- Reconocer los principales problemas que poseen los VFRCC.
- Verificar si existe mejora en el comportamiento mecánico de este material al incorporar la fibra como refuerzo, con respecto a un compuesto no reforzado.
- Estudiar métodos ambientalmente amigables para mejorar la durabilidad de los VFRCC.
- Realizar una caracterización previa del panel propuesto en la campaña experimental.
- Observar y registrar el comportamiento del panel antes mencionado, después de un proceso de envejecimiento acelerado y un envejecimiento natural.



introducción

introducción

1. antecedentes

2. estado del arte

3. e. a. industrial

4. mat./métodos

5. campaña expertl.

6. discusión datos

7. conclusiones

Introducción

Hipótesis

Las hipótesis aquí planteadas hacen referencia a las interrogantes que queremos responder con respecto a la campaña experimental. Como se mencionó anteriormente, siendo este trabajo de fin de máster un preámbulo a una tesis doctoral, estas hipótesis previas servirán para tener una visión más clara y amplia del tema a tratar.

- Comprobar si las fibras vegetales mejoran el comportamiento mecánico de un compuesto cementíceo reforzado con ellas.
- Analizar si es posible mejorar la durabilidad de un VFRCC, usando métodos de bajo costo ambiental.
- Comparar el comportamiento mecánico a flexión de VFRCC sometidos a: No Envejecimiento, Envejecimiento Acelerado (25 ciclos de Inmersión-Secado), Envejecimiento Natural (60 días a la intemperie).
- Comparar como influye el color en el comportamiento (mecánico a flexión, absorción de calor y humedad relativa), de un panel expuesto a la intemperie.

Introducción



Alcance

Este trabajo de fin de master está enfocado al estudio de los compuestos cementíceos reforzados por fibras vegetales, es decir, "se entiende por cemento reforzado con fibras el producto cuyo componente mayoritario es el cemento o aglomerantes hidráulicos. Las fibras de refuerzo pueden ser de uno o varios de los tipos siguientes: inorgánicos u orgánicos y sintéticos o naturales"[8].

El material que se pretende estudiar en esta investigación, está enfocado a la envolvente exterior del edificio. El límite de este trabajo de fin de máster viene dado por la elaboración de paneles delgados con dimensión aproximada de 300 x 300 x 10 mm. Realizados con una única dosificación y cantidad de fibra. Estarán compuestos por una matriz cementícea elaborada con 70% de Cemento Portland Blanco (CEM I) y 30% de Meta-caolín, reforzada con fibras largas de Lino y Cáñamo, colocadas a través de 4 capas de un textil no-tejido.

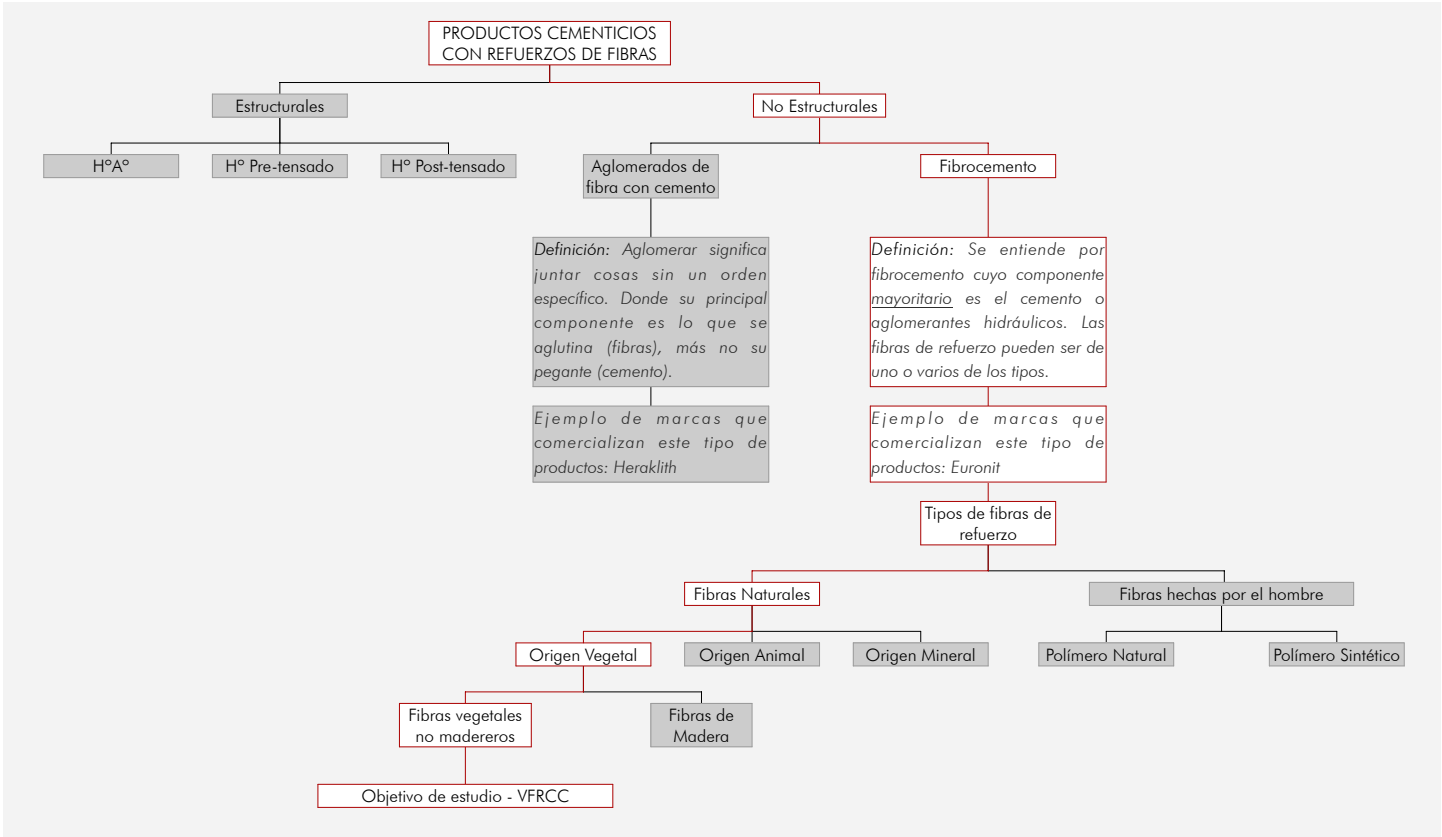
Para la fabricación de los paneles se empleará el método Hastchek.

Finalmente, la caracterización previa del material se realizará

con ensayos en laboratorio siguiendo la Norma UNE EN 12467:2013 (Placas planas de cemento reforzado con fibras- Especificaciones del producto y métodos de ensayo) [8]. Cabe mencionar que debido a la limitación de tiempo y especialmente, por tratarse de una evaluación previa del material, no se realizarán todos los ensayos que la norma exige para su aceptación, se han seleccionado los más relevantes y disponibles. Por estos mismos motivos, algunos de los ensayos se realizan con un número menor de las probetas mínimas requeridas.

Este primer acercamiento al material, permitirá en estudios posteriores, plantear el sistema constructivo más afín de acuerdo a sus características y al lugar donde pretende ser implementado.

Introducción



Mapa conceptual acerca del área de enfoque de este estudio. (Fuente Propia)

Metodología

Este trabajo de fin de máster está dividido en dos partes esenciales. La primera es teórica, consta de una introducción a los compuestos cementíceos, sus bondades y debilidades como material, además de una breve reseña histórica de su origen y evolución. Luego, nos introducimos en el mundo de los fibrocementos y como se han ido desarrollando a través del tiempo.

Dentro de esta primera parte teórica, se encontrará el Estado del Arte de los VFRCC, empezaremos con su definición, para posteriormente analizar sus componentes, ventajas, desventajas, durabilidad del material e investigaciones similares en pro de mejorar sus puntos débiles. Cabe recalcar, que si bien la bibliografía es extensa, cada autor plantea una matriz diferente e utiliza una o más fibras de distintos tipos y formatos, por ello, se trata de analizar sus resultados en pro del objetivo planteado.

A manera de conclusión de esta primera parte, se definirá la campaña experimental. Aquí se plantearán los materiales a usar, el tipo de fabricación, la normativa vigente y ensayos a los que se someterán las probetas.

La segunda parte es experimental, donde se narra la elaboración de los paneles y la realización de cada uno de los ensayos, así como los resultados.

Finalmente se concluye haciendo una comparación entre los resultados de los distintos tipos de envejecimiento, así como una comparación con un material comercial previamente seleccionado, para tener una noción más real de los resultados obtenidos.

1. Antecedentes Históricos

- 1.1. Compuestos cementíceos (hormigón, mortero y pasta de cemento): introducción y definición
 - 1.2. Breve reseña histórica del cemento y el hormigón. Importancia como material de construcción
 - 1.3. Necesidad de refuerzo: hormigón armado
 - 1.4. Búsqueda de nuevas alternativas para el refuerzo de compuestos cementíceos.
 - 1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales
-

1.1. Compuestos cementíceos (hormigón, mortero y pasta de cemento): introducción y definición

Es verdad que mucho se ha investigado sobre el cemento y los compuestos que se generan con él. Sus materias primas, procesos, puesta en obra, etc., han sido estudiados pero sin lograr abarcarlo del todo, pues conforme avanza el tiempo, se siguen perfeccionando sus técnicas, sus componentes y surgen nuevas dudas e interrogantes por resolver.

Desde sus orígenes una de las características más importantes es la facilidad de adaptación que posee (en su estado líquido), no solo a formas extrañas, sino también a texturas, colores, densidades, etc. Razón por la cual llegó a remplazar (por sus propiedades mecánicas) a otros materiales. La piedra artificial, como también se la conoce, hace referencia a la tan ansiada búsqueda del monolitismo dentro de la arquitectura. Claude Perrault menciona que “en una construcción, también resulta de gran belleza que parezca hecha de una sola piedra” [9]², pensamiento que hoy en día aún tiene vigencia.

Sus características mecánicas, no dejan de ser importantes, especialmente a compresión (cuando no requiere de otro material para su buen desempeño, como una armadura metálica).

Todas estas ventajas como material hacen que el uso de los

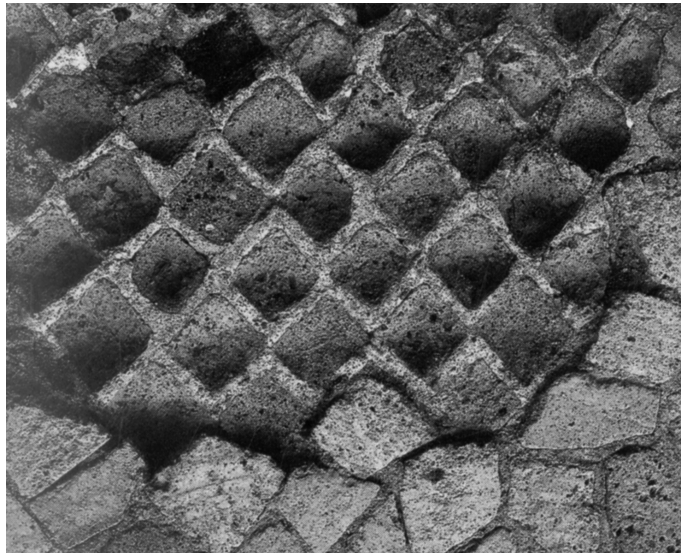
compuestos cementíceos, en especial del hormigón, se hayan propagado masivamente, durante el S. XX., autores como Le Corbusier, Mies Van Der Rohe, Louis Kahn, (en Europa), Louis Sullivan, Dankmar Adler, Frank Lloyd Wright ó Oscar Niemeyer, Vilanova Artigas, Paulo Mendes Da Rocha, Mario Roberto Álvarez (en Sudamérica), explotan el material por sus propiedades estéticas a más de las propiedades mecánicas.

Pero antes de continuar, se debe definir qué es un compuesto cementíceo, se trata de una matriz que contenga como aglomerante principal el cemento. Su combinación más simple es la pasta de cemento, elaborada con cemento y agua. Luego tenemos los morteros y hormigones, los cuales contienen áridos (materiales inertes) con distintas granulometrías, clasificados en: gravas, gravillas, arenas y finos. Hoy en día, los aditivos son parte esencial de estos compuestos, colaborando con la plasticidad, aceleración o retardo en tiempos de fraguado, impermeabilización, etc.

² Cita a C. Perrault, Les dix livres d'architecture de Vitruve [1.673], París, Errance, 1.999, pág. 44

1.2. Breve reseña histórica del cemento y el hormigón. Importancia como material de construcción

04



Se encuentran unas primeras muestras de hormigón rudimentario al norte de Chile del año 3000 A.C., donde se usaba algas calcinadas (huairo) a manera de conglomerante, mezcladas con agua de mar, obteniendo losas de hasta 6N/mm². [10]

Imagen 3_ Opus reticulatum[9]

Las composiciones de los distintos hormigones encontradas a lo largo de la historia varían según su cronología y locación. Por ejemplo los egipcios empleaban morteros de yeso y cal [10] en la construcción de las pirámides entre los años 2550 – 2570 A.C.

Pero son los romanos quienes dan un paso realmente importante. En primer lugar, poseían un amplio conocimiento de los materiales. En el siglo I A.C. era de conocimiento popular la descripción de las materias primas, dosificaciones y puesta en obra, gracias a escritos como los 10 libros de Vitrubio (“De Arquitectura”). El autor, arquitecto e ingeniero, narra a manera de una gran enciclopedia, conocimientos de la época referidos a: arquitectura, materiales de construcción y sus procesos de fabricación, decoración, y armamento militar [11]-

Así los romanos descubren la manera de fabricar un cemento a base de cenizas volcánicas y cal viva, llamándolo “cemento de puzolana”, debido a Puzzuoli, sitio donde se encontraba el depósito de estas cenizas [10].

Gracias a estos descubrimientos, los romanos logran construir un sinnúmero de obras de toda índole (acueductos, puentes,

1.2. Breve reseña histórica del cemento y el hormigón. Importancia como material de construcción

coliseos, etc.) perfeccionando cada vez más su técnica. El opus caementitium, como se lo denominaba en la época, lo encontramos a lo largo de todo su imperio [12], pero el Panteón de Agripa (año 27 A.C.) marco un punto de inflexión en la historia del hormigón. Su cúpula de 44m. de diámetro, aligerada con casetones, es una de las mejores aplicaciones del hormigón para la época.

Tras de la caída del imperio romano, se pierden muchos de estos conocimientos adquiridos. Se regresa al uso de cal y yeso, generando morteros bastardos que no alcanzaban las características de sus antecesores. En 1673, en París, Perrault publica "Les dix livres d'architecture de Vitruve", y es allí donde hace una explicación preliminar del endurecimiento de los morteros: "Resulta cierto todo lo que Vitrubio dice aquí sobre la cal, pero no extrae ninguna conclusión que haga entender la razón de los hechos extraños que produce su cocción, y cómo una piedra después de haber perdido su dureza en el fuego, la retoma por medio del agua al ser mezclada con la arena" [9]. Perrault continúa su investigación sin llegar a descubrir el proceso por el que atraviesa la cal tras la cocción.

En ciudades como Roma, Tívoli, París, Tolón y Cesarea (Palestina), antiguas ciudades del imperio romano, se hallan

muestras de un cemento más duro que las piedras que une [9].

Años más tarde, en 1752 Smeaton, ingeniero británico, realiza varios estudios para determinar la mejor piedra caliza y así fabricar cal hidráulica que empleará en la reconstrucción del faro Eddystone en Cornwall, Gales (Reino Unido) [11]. Entre 1756 y 1759, Smeaton construye el faro, y logra descubrir que los morteros de mejores características eran aquellos que poseían una importante cantidad de arcilla en su composición. En la segunda mitad del siglo XVIII, se realizan publicaciones de grandes proyectos enciclopédicos, textos, láminas, y se hace más factible la propagación de los conocimientos, gracias a estos se pueden comparar técnicas, materiales usados, tipos de hornos empleados, etc. [9]

En 1796 James Parker patenta en Inglaterra el técnica para realizar "cemento romano", se trataba de cemento hidráulico producido mediante la calcinación de nódulos de cal con alto contenido de arcilla. [10]

No es sino hasta 1813, cuando Victor Collet-Descotils descubre el elemento que permite el fraguado de los morteros, el sílice [9]. Su descubrimiento es publicado en ese año en el artículo "Notice sur la Chaux mayo" [11].

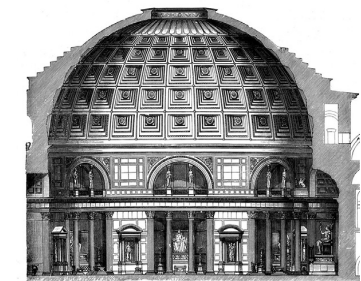
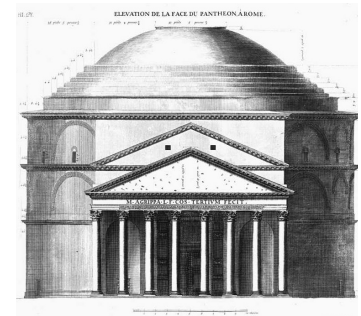


Imagen 4 _ Panteón de Agripa, alzado [13]

Imagen 5 _ Panteón de Agripa, alzado [13]

1.2. Breve reseña histórica del cemento y el hormigón. Importancia como material de construcción

06

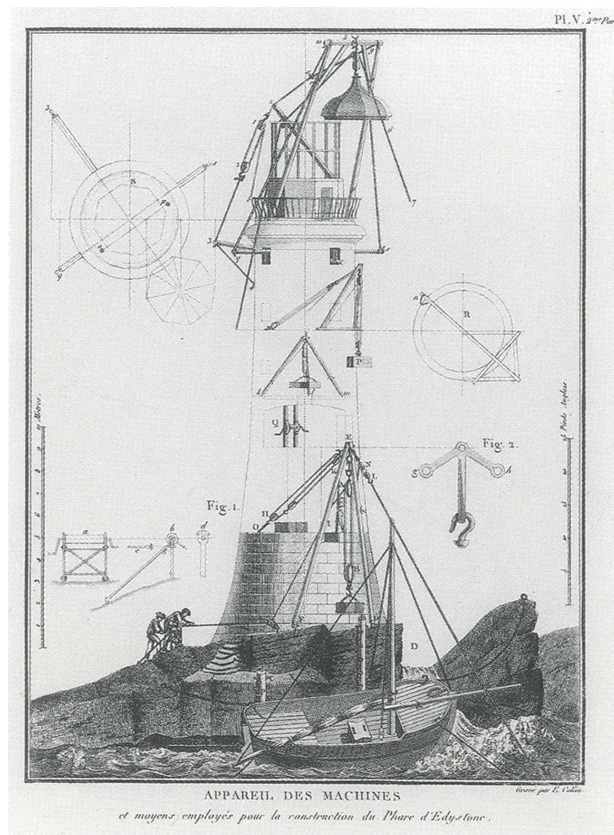


Imagen 6 _ Faro de Eddystone construido por Smeaton [9]

Y en 1817, Vicat tras varios experimentos que le permiten determinar la cantidad adecuada de cal, arcilla y materia silícica que intervienen en la calcinación, revela cómo fabricar la cal hidráulica artificial [9]. Es por ello que Vicat es considerado, sin duda, el padre del cemento. Con este nuevo método de fabricación elimina el problema de obtención de cemento según su localidad.

Joseph Aspdin en 1824, patenta por primera vez la fabricación del cemento, denominándolo "cemento portland" (por el color que adquiere la mezcla muy similar a la piedra de la localidad de Portland), el cemento adquiere una gran importancia y notoriedad. Gracias a ello se realizan varias investigaciones sobre el tema, que darán como fruto el hormigón armado y el fibrocemento.

Tras la I y II Guerras Mundiales el cemento pasa de una producción artesanal (8 millones tn./año) a una producción industrial (70 millones tn./año), convirtiéndose en un material de uso masivo [11].

Hoy en día las investigaciones sobre el cemento, morteros, hormigón, hormigón armado, etc., no han parado, al contrario, han incrementado. Sin lugar a duda el hormigón (y obviamente

1.2. Breve reseña histórica del cemento y el hormigón. Importancia como material de construcción

el cemento), es uno de los materiales más importantes en la construcción arquitectónica, civil e incluso de diseño [10]. Esto se debe a las múltiples cualidades que posee como material, y que justifican el lugar en el que hoy en día se encuentra.

Entre las más notables a destacar están, su capacidad adherente a otros materiales, y el monolitismo que se puede conseguir. Este último es muy importante a nivel estructural, ya que puede solucionar los nudos, sin la necesidad de uniones o elementos ajenos, que muchas veces debilitan la estructura. [10]

A más de sus muchas ventajas, los compuestos cementíceos se realizan con materiales económicos y abundantes (Imagen 11), tanto aquellos que se emplean en la elaboración del Clinker, como sus agregados (fino y grueso) [10].

Cada vez más son los estudios acerca de como mejorar su comportamiento, en especial hacia su punto más débil, la tracción y flexión. Es allí donde investigadores buscan nuevas composiciones, aditivos o materiales que refuercen el hormigón en este sentido. Hace pocos años se intensifica nuevamente el uso de fibras en una matriz cementícea, llevándonos a pensar ¿qué fibras podemos usar? ¿este nuevo compuesto cómo se comporta? ¿qué usos tiene? etc.

Material	Consumo energético relativo	
	Por unidad de volumen	Por unidad de masa
Hormigón	1	1
Acero	131	40
Aluminio	190	168
Vidrio plano	29	28
P.V.C.	27	62
Polietileno	29	67

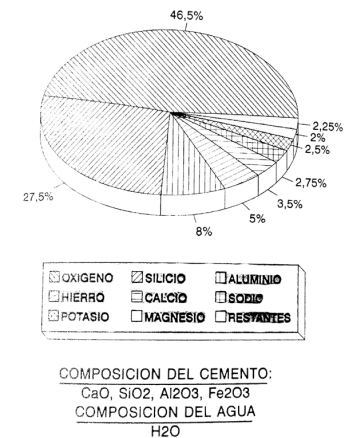


Imagen 7 _ Distribución de los elementos químicos en la litósfera [10]

Tabla 1 _ Consumo energético relativo de algunos materiales de construcción. [10]

1.3. Necesidad de refuerzo: hormigón armado

08

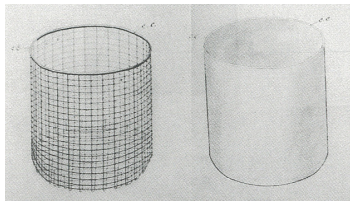


Imagen 8a_ Barca de ferrocemento de Josep Lambot, prototipo flotante. Inventor del ferrocemento, antecesor del hormigón armado. [14]

Imagen 8b _ Macetas de Monier. Parte de la lámina que acompaña la patente. [9]

Sabemos que el hormigón básicamente es un material de origen mineral, posee una excelente resistencia mecánica a la compresión, pero al igual que cualquier material pétreo es quebradizo, es decir, tiene un mal comportamiento a tracción, flexión y cortante, incluso en hormigones de alta resistencia este valor equivale aproximadamente a un 10% de la resistencia a compresión [12]. Es por ello que en la mitad del siglo XIX, contando con el cemento como producto industrial moderno, eficaz y de gran calidad se realizan investigaciones simultáneas que permitan dar un paso más en su evolución.

En 1845 Josep Lambot, combina el hormigón y el acero, obteniendo un primer hormigón armado [9]. El 30 de enero de 1855, patenta una barca de hormigón armado, sugiriendo el material como remplazo de la madera en las embarcaciones navieras. En su descripción, menciona que se realiza una reja metálica lo más parecida a la forma final, para luego cubrirla de cemento hidráulica. La marina en principio rechazó su sugerencia debido a su peso y a la fragilidad del material en caso de encallar. Pero años más tarde, con la I y II Guerras Mundiales y la escasez del acero, se construyeron algunas embarcaciones con este material: el primero en 1917 en Bilbao, una gabarra de nombre "Catalina" de 17 x 5,5 x 2,2

m. y 63 tn. de peso [11].

De igual forma Joseph Monier, intenta construir unas macetas de fino espesor que no se agrieten. Introduce una malla metálica antes que el hormigón fragüe, logrando solventar el problema típico de un material rígido, su fragilidad ante esfuerzos de tracción [10]. En 1867 obtiene su primera patente en Francia. Entre 1867 y 1891 obtiene 20 patentes para utilizar su sistema, con variedad de aplicaciones, desde pasarelas para peatones hasta la fabricación de casas fijas y móviles [11].

En el período inmediato, se genera controversia entre ingenieros y constructores, debido a que no se tenía un método de cálculo establecido. Los modelos teóricos no coincidían con los modelos construidos a escala real, y esto traía problemas. Por un lado estaban quienes proponían métodos "empíricos" de cálculo y por otro lado quienes se inclinaban por "métodos científicos" basados en la Resistencia de Materiales [11].

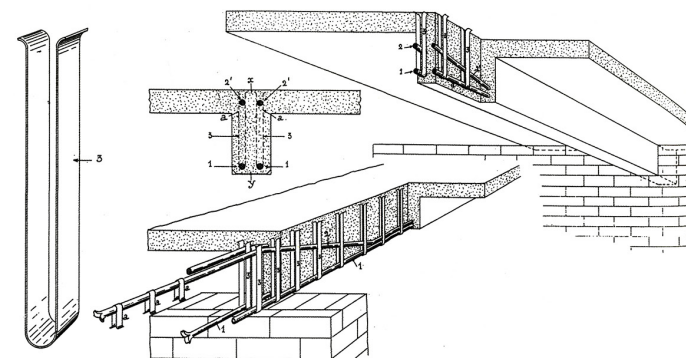
Hennebique, un personaje importante dentro del hormigón armado, estaba a favor del "método empírico" basado en la experiencia. Su sistema consistía en introducir una grapa de hierro en la argamasa, la cual colocada correctamente

1.3. Necesidad de refuerzo: hormigón armado

umentaba considerablemente la resistencia elástica del compuesto. A finales del siglo XIX y principios del XX, patenta varias de estas ideas (Imagen _9), y sobre todo recluta y capacita a ingenieros con sus nuevos métodos, alcanzando casi el 20% del mercado mundial del diseño y construcción de estructuras de hormigón armado [15]. Llega a tener 63 oficinas, construye más de 150.000 obras, y publica periódicamente la revista "Le Béton Armé" donde difundía sus resultados y vanagloriaba su sistema [11]. Hennebique es sin duda uno de los personajes que más contribuye a la masificación del uso del hormigón armado.

Por otro lado, la competencia principal de Hennebique en Europa era la empresa Ways und Freytag, partidarios del "método científico" de cálculo. En 1891 contratan al ingeniero Emil Mörsch, y es quien diseña el método de cálculo de secciones de hormigón, conocido como el "método clásico", vigente hasta hace poco tiempo (1970) [11].

Finalmente, una dualidad entre ambas partes permite encontrar un método cuyas previsiones teóricas se ajustaban más a las construcciones en escala real, dando libertad de diseño tanto para arquitectos e ingenieros



A)



B)

Imagen 9 _ A) Diagrama del sistema de construcción con cemento armado ideado por Hennebique en 1897, una mejora de su anterior patente lanzada en 1892. Se basa en el empleo de grapas de acero corrugado, pero las vigas de hormigón están reforzadas con varillas. B) Simulación de carga para promocionar el sistema Hennebique [15]

1.3. Necesidad de refuerzo: hormigón armado

10



Imagen 10 _ Unidad Habitacional de Marsella, arquitecto Le Corbusier 1946 - 1952 (Fuente Propia)

Años después, arquitectos de la época como Le Corbusier, Mies Van Der Rohe, Louis Kahn, Frank Lloyd Wright, entre otros, popularizan su uso, no solo como un material estructural sino por sus características estéticas, realizando grandes obras donde el hormigón es el protagonista.

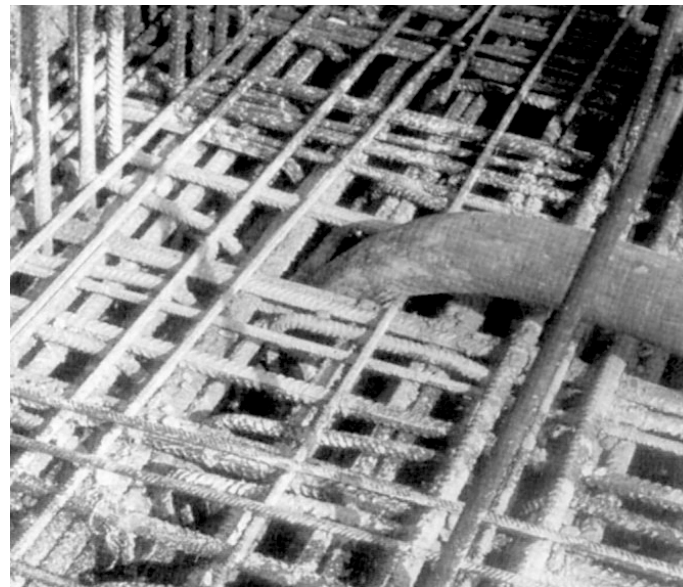
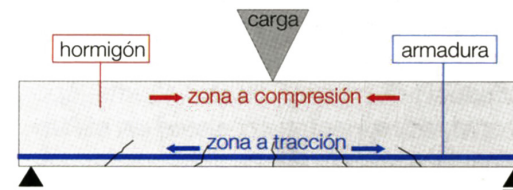
1.4. Búsqueda de nuevas alternativas para el refuerzo de compuestos cementíneos

Si partimos del formato de refuerzo, podemos decir que inicialmente se contaba con dos: las armaduras metálicas (hormigón armado), y las fibras (fibrocemento). Ambas con un formato, uso y escala distinta, pero con un mismo objetivo, mejorar las características resistentes del material (pasta, mortero u hormigón).

Como se mencionó anteriormente, entre mediados del siglo XIX y principios del XX, se inventa el hormigón armado, al juntar el hormigón con el acero gracias a las características que los complementan³.

Por otro lado, a inicios del siglo XX nace el refuerzo de pastas de cemento hidráulico con fibras de asbesto o amianto, más conocido como fibrocemento, y el cual trajo un cambio importante en la arquitectura. (La historia de este material y su influencia en los VFRCC se explicará más adelante).

Centrando el trabajo hacia los refuerzos con fibras. Luego de la afección a la salud, tanto de trabajadores como de los ciudadanos en general por parte del asbesto-cemento, la comunidad científica y productores de este material buscaron otras fibras que replacen el asbesto con iguales características. Una primera opción fue la celulosa (fibra vegetales), pero tras



3 “el hormigón y acero poseen coeficientes de dilatación térmica similares en una fluctuación normal de temperaturas y puesto que estos dos materiales no reaccionan químicamente entre sí, no se presentan efectos perjudiciales de corrosión. Debido al contenido de cal, la matriz del hormigón presenta una fuerte reacción alcalina tanto en su estado fresco como endurecido. Este entorno alcalino produce la pasivación del acero y lo protege de la corrosión” [12].

Imagen 11 _ Armadura metálica en el hormigón armado [16]

Imagen 12 _ Hormigón armado In Situ [16]

1.4. Búsqueda de nuevas alternativas para el refuerzo de compuestos cementídeos

la aparición de las fibras sintéticas, las fibras vegetales quedaron de lado.

Investigaciones se inclinan por refuerzos con fibras sintéticas como las plásticas, de vidrio, carbón, aramida, etc. [17]. A continuación se describen algunas de ellas:

_ Refuerzo Fibra de Polipropileno

Las fibras de polipropileno son básicamente polímeros termoplásticos, que se obtienen de la polimerización del propileno. Son fibras de longitud corta entre 25 y 75 mm. y que se colocan en el hormigón o mortero durante su amasado. Por el bajo módulo de elasticidad de estas fibras la resistencia a flexión no aumenta en gran medida, sin embargo, su deformación post-fisuración es elevada [10].

_ Refuerzo de Fibra de Vidrio

Para la utilización de este material, es fundamental que la fibra de vidrio sea resistente al álcalis y de preferencia el mortero sea de baja alcalinidad. Su mayor aplicación se da en morteros y pastas de cemento, dando lugar al conocido Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC). La principal mejora que produce en los compuestos es el aumento de la tenacidad y la

capacidad de absorción de energía frente al punzonamiento con respecto compuestos sin refuerzo [10]. Posee una resistencia a la tensión de 800N/ mm² [17]. Estos se agrupan en hilos que posteriormente formaran redes, trenzados, tejidos o mallas. Poseen grandes ventajas como ser incombustibles, no absorbentes y químicamente estables [18].

_ Refuerzo de Fibra de Carbono, [Carbon Fiber Reinforcement Concrete (CFRC)]

Las fibras de carbono son bien conocidas por su alta resistencia a la tensión (1.500 N/mm²) [17]. Poseen estabilidad dimensional a altas temperaturas. Se obtienen del filamento continuo de 0,002 pulg. (0,0508 mm.) de diámetro. [18]

_ Refuerzo de Aramida o Poliamida Aromática

La fibra de aramida se obtiene cortando una solución de polímero mediante una hiladora. Son fibras con una estabilidad térmica alta, buena resistencia y alta rigidez. Tiene una buena resistencia al álcalis del hormigón por lo que hace ventajoso su uso. Además poseen una buena resistencia a la tracción y bajo peso. Su inconveniente al igual que las fibras de carbono es la baja resistencia a los rayos UV por lo que debe estar colocada dentro de una matriz.

1.4. Búsqueda de nuevas alternativas para el refuerzo de compuestos cementídeos

Sin embargo, estos materiales han tenido un proceso de adopción un tanto lento por parte de la industria, principalmente por su coste económico y afectación ambiental, dejándolos restringidos para usos exclusivos (entornos agresivos, presencia de ácidos, cloruros, etc.).

Además cada una de las fibras mencionadas posee distinto método de aplicación y formato (cortas, largas, en cordones, barras, mallas biaxiales o multiaxiales, con diámetros diversos, etc.). Esta amplia variedad dificulta su estandarización [17]. Si bien la Normativa ha realizado un esfuerzo por incluirlas ("Recomendaciones para la utilización de hormigones con fibras", del EHE-08 Instrucción del Hormigón Estructural [19]), aun no existe un acuerdo que regularice las propiedades de estos materiales para el diseño [17].

Nuevamente, las investigaciones se centran hacia las fibras vegetales, en especial por su bajo coste económico y bajo impacto ambiental, en comparación a las fibras sintéticas. Los VFRCC alcanzan muy buenos resultados incentivando la investigación en esta dirección.

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)

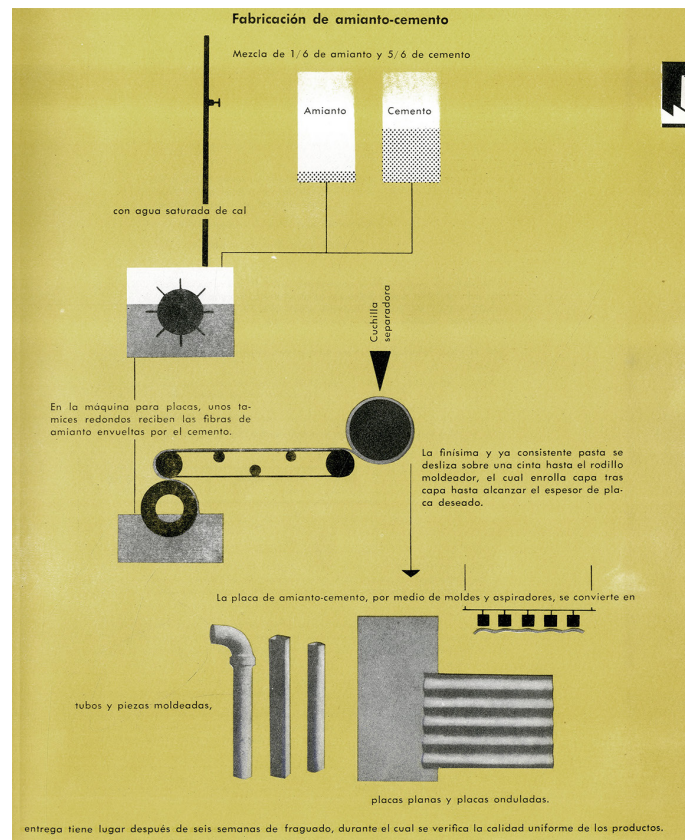
14

4 "The material fiber cement has a cultural history and identity of its own....It is a culture of simplicity and experiment, a culture of every day buildings and the architectural avant-garde. The identity of the material lies in its unmistakable authenticity in appearance and haptic, not forgetting its very universality of use for roof, facade, finishings, furniture and many unusual applications in garden, landscaping and engineering. ...it is primarily a material for architects. They have made the most of the possibilities of the material to incorporate its individual meaning in their designs."

5 Neologismos en referencia a la palabra latina Aeternus = eterno.

Imagen 13 _ Proceso de fabricación del amianto-cemento. [21]

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)



"El material fibrocemento tiene una historia cultural e identidad propia.... Es una cultura de simplicidad y experimentación, una cultura de edificios cada día y arquitectura de vanguardia. La identidad de ese material, en su autenticidad inconfundible en apariencia y háptica, sin olvidar su propia universalidad de uso para techo, fachada, acabados, mobiliario y muchas aplicaciones inusuales en el jardín, paisajismo e ingeniería. ... es sobre todo un material para los arquitectos. Ellos han creado la mayoría de las posibilidades del material para incorporar su significado individual en sus diseños."⁴[20]

Casi de manera simultánea al nacimiento del hormigón armado, nace el fibrocemento, como se lo conoce comúnmente. En realidad se trata de una pasta de cemento hidráulico reforzado con fibras de amianto.

El amianto o asbesto, ambos nombres genéricos de una familia de minerales fibrosos, conocidos especialmente por su alta resistencia al fuego. Con cerca de 30 especies diferentes, tan sólo 6 tienen interés comercial. Se clasifican en dos grandes grupos: grupo anfíboles (crocidolita, antofilia, tremoolita, amosita, y actinolita) y grupo serpentinas (crisotilo) [11]. De este mineral se extraen filamentos con características

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)

especiales como alta resistencia al fuego, aislante de calor, aislante acústico, buena durabilidad, alta resistencia al álcalis del cemento, buena resistencia a tracción, buena resistencia biológica (hongos y microorganismos). Su aplicación fue muy variada, tanto dentro como fuera de la construcción, se usó en trajes resistentes al fuego, blindaje de explosivos, tuberías, mechas, filtros para cigarrillos, etc.

El ingeniero textil Ludwig Hastchek, funda en 1893 “la primera fábrica de asbestos Autro-Húngara” y comienza su experimentación en busca de nuevos productos. Durante 7 años trabajó en productos resistentes al fuego para revestimientos de cubiertas, que fuesen ligeros, baratos y más duraderos [20]. En 1900, patenta una máquina que permite la incorporación de láminas de amianto de pocos milímetros de espesor en una pasta de cemento portland. La proporción usada era 9:1 (cemento, amianto) y veía que tenía potencial como material de construcción. Posteriormente ampliaría su patente con máquinas y métodos que permitían hacer placas corrugadas, las cuales poseían un mayor módulo de resistencia ampliando el abanico de usos. En 1903 su fábrica ya producía varios tipos de planchas de cubierta, bajo la marca registrada de “Eternit”⁵ posteriormente conocida como “ETERNIT – Werke Ludwig Hastchek” [11].

En 1903 Hastchek lleva su producto a la Feria Habitacional de París, donde su material al igual que el hormigón armado son los protagonistas. Surgen comentarios como el de “La Revista Cemento Armado núm. 9 de 1903 ... “Los que hayan visitada la Exposición de la Vivienda del presente año en París no habrán dejado de sorprenderse á la vista de este nuevo material de construcción que procede de envolver con cemento las fibras de amianto, sometiendo después el conjunto a una fuerte compresión. Las propiedades especiales del Fibrocemento son: una gran resistencia; se puede aserrar y clavar como la madera; es impermeable e incombustible.”” [11]

Como era de esperar, los empresarios de la época, en especial aquellos que estaban vinculados con el cemento, vieron en el fibrocemento una gran oportunidad para no depender únicamente de las obras públicas.

En 1923 se crea la Sociétés Associés de Industries Amiante-Ciment (SAIAC), con sede en Suiza, cuyo objetivo principal era generar un espacio para el intercambio de conocimientos técnicos y experiencias. Además ayudar con la adquisición de materias primas, regulación de los mercados, etc. [11].

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)

16

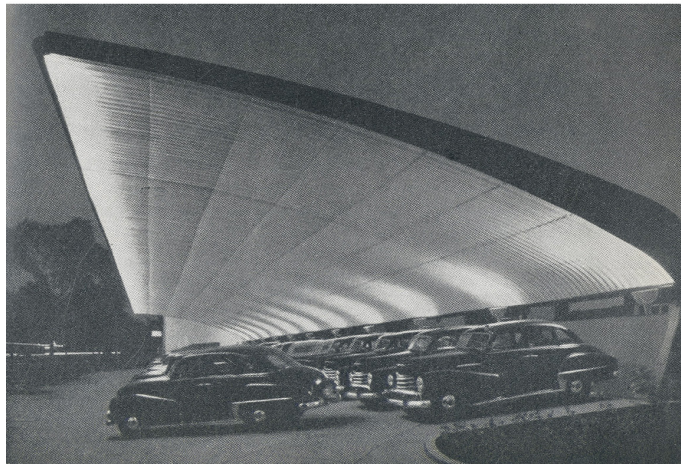
6 Fibrolite: Fábrica australiana fundada en 1917 por un empresario escocés, quien conoció el fibrocemento en la Feria Habitacional de París.



“El material fibrocemento tiene una historia cultural e identidad. Con la I y II Guerras Mundiales, se da un grave problema de suministro de materias primas, ya que gracias a sus propiedades, el amianto pasa a ser considerado material estratégico. Esto sirvió de incentivo para iniciar investigaciones sobre materiales que pudiesen remplazar el amianto ya sea parcial o totalmente, y así mantener la producción [11].

En 1945, se da la primera producción de mezcla de amianto y celulosa, en la fábrica de Fibrolite⁶. Los mejores resultados eran obtenidos con fibras de papel fabricadas siguiendo el método kraft, aunque sin llegar a resultados similares a los del amianto [11].

Imagen 14 _ Obras en las que se emplea Eternit. A) Fábrica de tejidos de cinta de goma en Gossau, Suiza. Cubierta con placas onduladas curvadas, perfil 5. Arquitectos: Danzeisen y Vosper, St. Gallen. B) Nave de ventas Opel, de Frankfurt/Main. Arquitecto: Günther Lange, Frankfurt/Main.



Lo que en principio fue un material sin calidad estética, pasa a ser un material en donde los arquitectos desean plasmar expresiones arquitectónicas, convirtiéndose en un material de vanguardia. Por un momento Le Corbusier estuvo ligado a Eternit AG, Suiza, y diseñó un kit completo para casas prefabricadas. Pero no será hasta 1957 cuando aplica este material en todo su esplendor en la “Unité d’habitation”, como parte de la Exhibición Internacional de Construcción de Berlín. [20]

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)

La masificación del fibrocemento llega a ser tal, que en 1967 autores como Neufert, conocido internacionalmente por su libro "Arte de Proyectar Arquitectura", escribe dos manuales importantes para Eternit, uno de ellos el "Manual del amianto-cemento: placas onduladas Eternit-Uralita"[21], los cuales han sido revisados y re-impresos ocho veces [20]. En ellos se aprecia la variedad de productos, su aplicación en la construcción y los resultados de los distintos ensayos que avalaban las bondades del material.

La década de los 70's es la época en que el fibrocemento está en auge. Su producción había ascendido hasta 20 millones tn/año y consumía cerca del 10% de la producción mundial de cemento. Posterior a este período la producción cae progresivamente debido a las múltiples afectaciones a la salud.

Afección a la Salud Pública

Las fibras de amianto no son detectables a la vista, tacto y olfato, [22]. Además posee un diámetro aerodinámico, que le permite flotar en el aire y facilita su inhalación sin ser frenada por el sistema mucociliar, y gracias a su elevada longitud y forma recta, no es de fácil eliminación por el sistema linfático. Según el tipo de amianto, el tiempo de exposición y ciertos factores externos (exposición al humo de cigarrillo, constitución del paciente,

etc.), el paciente puede desarrollar enfermedades pulmonares, entre las más comunes están: fibrosis o asbestosis pulmonar, enfermedades pleurales benignas, cáncer broncopulmonar, mesotelioma pleural, entre otras, ocasionando la muerte en la mayoría de los casos. [11].

En 1927 el British Medical Journal, publica científicamente por primera vez un caso documentado. Se trata de una obrera que estuvo expuesta durante 20 años al amianto por trabajar en la empresa Turner & Newall, la paciente falleció en 1924 [11].

Luego de prohibiciones parciales, de algunos tipos de amianto, restricciones en ciertos usos, etc. Finalmente la DIRECTIVA 1999/77/CE DE LA COMISIÓN del 26 de julio de 1999, reunida en Bruselas, prohíbe la "utilización del amianto y productos que lo contengan". Publicando su resolución en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas el 06/08/1999 [24].

En España una primera prohibición del tipo anfíbol de amianto se da en 1989, mientras que bajo la Orden Ministerial del 07 de diciembre del 2001, queda totalmente prohibido su uso [22].

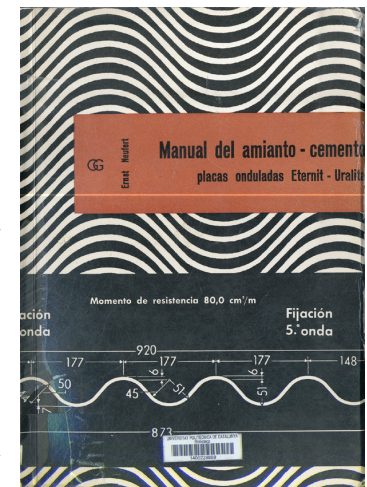


Imagen 15 _ Portada del "Manual del amianto-cemento: placas onduladas Eternit-Uralita"[21]

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)



Remplazo del Amianto

La falta de minas de amianto en ciertos países, pero en especial la escasez debida a las Guerras Mundiales, el reconocimiento de la asbestosis pulmonar y mesotelioma como enfermedades laborales (Alemania, década del 40), etc. promueve las investigaciones en buscar un remplazo de este material.

Inicialmente las investigaciones se inclinan por fibras naturales, que mantengan el bajo precio y sean abundantes como su antecesor. Como se mencionó anteriormente, Fibrolite realizó una de las primeras sustituciones parciales del amianto por fibras de celulosa (fibras naturales) en 1945, aunque sin llegar a conseguir resultados similares a los del amianto-cemento.

En Dinamarca por ejemplo, el uso de fibras de celulosa como remplazo parcial de las fibras de asbesto era común, intentaban mejorar el tiempo de filtrado de los paneles y la resistencia al impacto. En la Segunda Guerra Mundial el desecho de fibras de celulosa, fue usado para la producción de paneles de cemento reforzados con esta, un ejemplo de ello era la marca "Cembrit"[25].

Años más tarde en la década de los 60's, fibras de vidrio, alcohol polivinílico (PVA), acero, plásticos, etc., fueron introducidas en

las matrices cementíceas, llegando a resultados muy similares con respecto al amianto-cemento. Sin embargo, su alto costo restringió su uso para casos muy especiales [25].

Paralelamente, en la misma década, los investigadores ven en las fibras naturales una buena opción para ser utilizadas en elementos delgados de hormigón, ya sea en láminas de cubiertas o paneles de pared. Se impulsa la investigación de las fibras vegetales y en la década siguiente se reportan y publican los primeros resultados favorables, en especial por ser una alternativa económicamente interesante aplicable a países en vías de desarrollo [26].

Como sabemos el uso de las fibras naturales (vegetales o animales) no nace aquí. No se tiene una fecha exacta de cuando inicia su uso en la construcción, sin embargo podemos considerar que su utilización data de tiempos pre-históricos. El uso de fibras naturales más característico ha sido el reforzar una matriz frágil y quebradiza, ya sea la tierra, yeso, cal o más recientemente el cemento. En sus inicios las encontramos tanto en elementos estructurales (bloques de adobe, muros de tapial, tabiques de bahareque⁷) como en no-estructurales (estucos, cielos rasos, revocos de tierra, yeso o cal, etc.). Desde

Imagen 16 _ Sellos de material que contiene amianto. [23]

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)

ese entonces, ya se percibía como brinda ductilidad y evita el agrietamiento del compuesto.

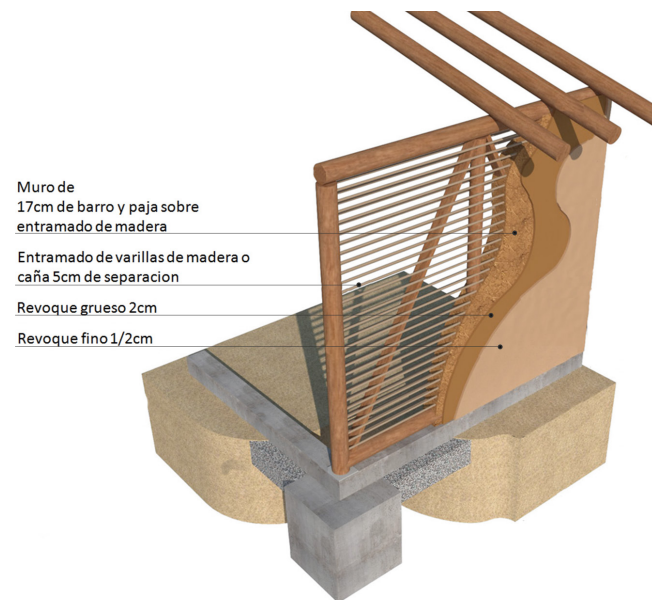
Quizás el primer artículo publicado sobre cementos reforzados con fibras vegetales fue en 1976 por Bruthans, Z.; Collazo, R.; Romero, E.; "Materiales ligeros de fibras vegetales aglomeradas con cemento. Cáscara de arroz-cemento", publicado en el Boletín Técnico CIEC-Cuba 2,1-11. Anterior a este, existía información de bambús o cañas como refuerzo del cemento [5].

A partir de aquí, se dan muchos ejemplos de investigaciones usando fibras vegetales, algunos de ellos destacan por la reducción en costo comparado con materiales tradicionales; y otros por el estudio del material en sí y el enfoque hacia la explotación de su potencial.

Uno de estos ejemplos es el que realizó Hidalgo López en Guayaquil- Ecuador.

Diseñó y construyó 12 casas a manera de un programa de vivienda experimental. Su investigación demostró que el sistema usado costaba un 60% de las viviendas (de área similar) provistas por el gobierno, para personas de escasos recursos.

Las viviendas eran realizadas con refuerzos de bambú [5]⁸.



- 7 Bahareque: Pared, con estructura de madera, un entramado de cañar o carrizo y revoque de tierra reforzado generalmente con paja u otro tipo de fibra. [50], [51]
- 8 El piso era compuesto por un forjado de 8cm reforzado con malla de bambú en las regiones donde se apoyaban paredes. Las paredes eran prefabricadas en marcos de bambú, recubiertas a los dos lados por cañas y un revoco de mortero de cemento [5]

Imagen 17 _ Muro de bahareque. [27]

1.5. Reseña histórica del fibrocemento y los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales (VFRCC)

Por otro lado están estudios que buscan encontrar las capacidades máximas del material. En este estudio por ejemplo, se analizó el efecto de variar la cantidad de fibra, usando una composición de mortero y tamaño de la fibra ($L=50\text{mm}$) constantes. Sus resultados fueron que a mayor cantidad de fibra disminuye el Módulo de Young y la Resistencia Mecánica de Compresión; sin embargo, se observó un especial aumento en la Resistencia al Impacto gracias al refuerzo de las fibras [5].

Podemos seguir mencionando una infinidad de ejemplos más acerca cómo las fibras vegetales cobran nuevamente importancia. Ventajas como su baja densidad, poca conductividad térmica, escaso coste energético, procedente de fuentes renovables e insignificante coste económico, las vuelven interesantes para su estudio.

Gracias a las características transmitidas a través de las fibras vegetales al compuesto y a su potencial ambiental, percibido en los últimos años, los investigadores se muestran interesados en superar el principal punto débil de los VFRCC, su durabilidad.

2. Estado del Arte Académico: Compuestos Cementíceos Reforzados con Fibras Vegetales (VFRCC)

- 2.1. Introducción
 - 2.2. Definición de compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales
 - 2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales
 - 2.4. Durabilidad de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales
 - 2.5. Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales
-

2.1. Introducción

Como se mencionó anteriormente, una de las primeras fibras que se introdujo en una matriz cementícea fue el amianto o asbesto. Durante el período de las Guerras Mundiales el material sufrió escases, lo que llevó a buscar alternativas como la celulosa. Si bien los resultados fueron buenos a un coste razonable, no se igualaban a los obtenidos con el primero. Posteriormente, con el descubrimiento de la relación entre las enfermedades pulmonares y el amianto, y la falta de durabilidad de la celulosa en los compuestos, se optó por las fibras sintéticas. Las más usadas fueron las fibras de PVA, poseían características superiores a las de celulosa (mayor resistencia, módulo de elasticidad y durabilidad), pero a un elevado coste económico [11].

Todo este contexto, sumado a los múltiples problemas medio ambientales, ha generado una creciente conciencia mundial en buscar materiales alternativos como las fibras vegetales. Las cuales son baratas, renovables, reciclables, biodegradables y abundantes en casi todo el planeta [28].

Este último nos lleva a pensar, en la localidad de las materias primas. Los altos costos de la construcción son ocasionados muchas veces por la alta cantidad de energía necesaria en la

manufacturación y los largos trayectos de transporte [5]. Lo que se traduce en una contribución extra en la emisión final de CO₂ y el coste económico del material.

Por otro lado, (mencionado al inicio de este TFM), la falta de vivienda como uno de los problemas más críticos en Latinoamérica, el rápido crecimiento de la población y la falta de medidas necesarias para suplirla [5]; nos llevan a pensar en materiales que logren ajustarse a los requerimientos actuales. En el Second Symposium on Building Materials for Low Cost Housing, en Bangkok durante enero de 1987, se lista las características a ser impulsadas como estrategias en edificios de bajo coste:

- Participación de los usuarios.
- Uso de los recursos y técnicas locales.
- Uso de pequeñas unidades de producción que puedan ser transportadas a otros sitios.
- Poca demanda energética

2.1. Introducción

Como menciona Agopyan en "Vegetable fibre reinforced building materials - developments in Brazil and other Latin American countries" [5], el uso de fibras vegetales pueden contribuir a una solución posible en función a lo citado anteriormente.

Las fibras vegetales combinadas con una matriz cementícea generan materiales compuestos de bajo peso, bajo coste energético, bajo precio e incluso reciclables.

El objetivo principal de reforzar una matriz frágil (pasta, mortero u hormigón) es mejorar su resistencia mecánica a tracción y la ductilidad del material.

Las fibras logran mejorar el comportamiento del material después de la primera grieta [29]. La tenacidad en la fase post-agrietamiento brinda al nuevo compuesto la capacidad de deformarse y aumentar su resistencia al impacto, es decir, su capacidad de absorber energía. Abandona su condición de fragilidad y pasa a ser un material dúctil, con mejores prestaciones para las exigencias actuales. Este tipo de materiales están enfocados a usos donde la ductilidad es importante, como por ejemplo en elementos de fachadas e interiores, paneles de forjado, cubierta, etc.

No obstante, existe un punto en contra, la durabilidad de la fibra vegetal dentro de una matriz cementícea. Como sabemos los compuestos que contienen cemento (pasta, mortero u hormigón), tienen un pH elevado, es decir son alcalinos, y las fibras vegetales se descomponen con mayor rapidez en este medio. Por ello a lo largo de este Estado del Arte hablaremos también de cómo se da este proceso de deterioro de la fibra, los distintos mecanismos para tratar de evitarlo y dejaremos sentadas las bases para lo que será la Campaña Experimental en el Capítulo 4.

2.2. Definición de compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales

El Diccionario de Arquitectura y Construcción de Broto y Camacho [30], da los siguientes significados:

“Hormigón armado con fibra: Hormigón reforzado con fibras de vidrio para reducir su peso y mejorar su resistencia a la tracción.”

“Fibroceso: Material compuesto con amianto y cemento portland, empleado en revestimientos y en las cubiertas.”

(Hoy en día estos conceptos están un tanto erróneos, pues se debe omitir la especificidad de la fibra y dejar abierto el campo a la gran variedad existente.)

La Norma UNE EN 12467:2013⁹ [8], da una definición más acertada:

“Se entiende por cemento reforzado con fibras el producto cuyo componente mayoritario es el cemento o aglomerantes hidráulicos. Las fibras de refuerzo pueden ser de uno o varios de los tipos siguientes: inorgánicos u orgánicos¹⁰ y sintéticos o naturales¹¹. No deben presentar áridos de tamaño superior a 4 mm y pueden añadirse los componentes que sean compatibles y no tengan influencia negativa en el comportamiento del producto”.

Esta investigación está enfocada en el uso de fibras orgánicas, naturales, de origen vegetal, como refuerzo de una matriz a base de cemento. Aunque ya se ha usado anteriormente las siglas VFRCC, (Compuesto Cementíceo Reforzado con Fibras Vegetales), a partir de este punto en el trabajo de investigación es la manera en que se define los compuestos que son el objetivo de estudio.

De igual manera, me referiré al antiguo “fibroceso” como “amianto-cemento” o “asbesto-cemento”. Mientras que la palabra “fibroceso” será usada para llamar a un compuesto elaborado con una matriz de cemento y reforzado con cualquier tipo de fibra.

⁹ Normativa Vigente (última revisión Julio/2014). Utilizada en la Campaña Experimental.

¹⁰ Orgánico: sustancias químicas basadas en carbono e hidrógeno generalmente de origen animal o vegetal [52]. Inorgánico: compuestos que están formados por distintos elementos, pero en los que su componente principal no siempre es el carbono. Un compuesto orgánico se forma de manera natural tanto en animales como en vegetales, uno inorgánico se forma de manera ordinaria por la acción de varios fenómenos físicos y químicos: electrólisis, fusión, etc. [53]

¹¹ Sintético: aquellos elementos químicos creados artificialmente y cuya existencia no ha sido observada en la naturaleza [54]. Natural: Proveniente de la naturaleza.

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

¹² Según la Norma UNE EN 197-1: CEM - I

Este compuesto busca brindar una mejor prestación a la demanda actual. Entre de ellas están la ductilidad y resistencia al impacto, de manera similar como lo hacía su antecesor, el asbesto-cemento.

Dentro de las mejoras obtenidas, gracias al refuerzo por fibra vegetal, están el aumento de su resistencia mecánica a flexión, ductilidad, resistencia al agrietamiento, baja densidad y baja conductividad térmica [31].

Los elementos que componen este material, son:

- Matriz cementícea: Mortero o Pasta de Cemento.
- Fibras Vegetales: de uno o varios tipos / cortas o largas / unitarias o haces.

2.3.1. Matriz: mezcla a base de cemento

La matriz cementícea que se utiliza generalmente en este tipo de compuestos está formada por: Cemento Portland Ordinario¹², Áridos, Agua, Aditivos y Adiciones. En coordinación con el refuerzo que va a recibir, cada uno de estos materiales deberá poseer una características específicas que permitan el mejor desempeño del material.

En mucha de la bibliografía revisada, nombran a la matriz como concreto u hormigón, cuando en realidad por el reducido tamaño de árido que se requiere no puede tomar este nombre. En realidad las matrices que se usan para este tipo de compuestos son morteros con áridos finos o pastas de cemento.

2.3.1.1. Características de la matriz

Uno de los aspectos más importantes ha tener en cuenta en este tipo de matrices, es el máximo tamaño de árido admitido. Como veremos más adelante, la granulometría del árido es bastante pequeña, lo cual influye directamente en la cantidad de aglomerante.

Por otro lado, se requiere que la matriz permita una adecuada

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

trabajabilidad del compuesto y una buena penetración en la fibra, por tanto, debe ser fluida.

La relación agua/cemento es diferente a la de un mortero convencional, como se verá más adelante, se tiene que considerar la suficiente cantidad de agua para hidratar correctamente el cemento a pesar de la pérdida ocasionada por la absorción de la fibra.

2.3.1.2. Cemento portland

Según Hornbostel [18]:

“Cemento incluye a cualquier material aglomerante que es capaz ya sea de unir porciones de sustancias no adhesivas por sí mismas en un todo cohesivo, o de cementar materiales no adhesivos”

El cemento actual proviene mayormente de la molienda del Clinker, fabricado generalmente en un horno tubular rotatorio a partir de la sinterización a altas temperaturas de caliza y arcillas molidas [32]. Luego de ser molido el Clinker se le añade una cantidad de sulfato de calcio (yeso), para controlar el fraguado, convirtiéndose en un cemento portland [16].

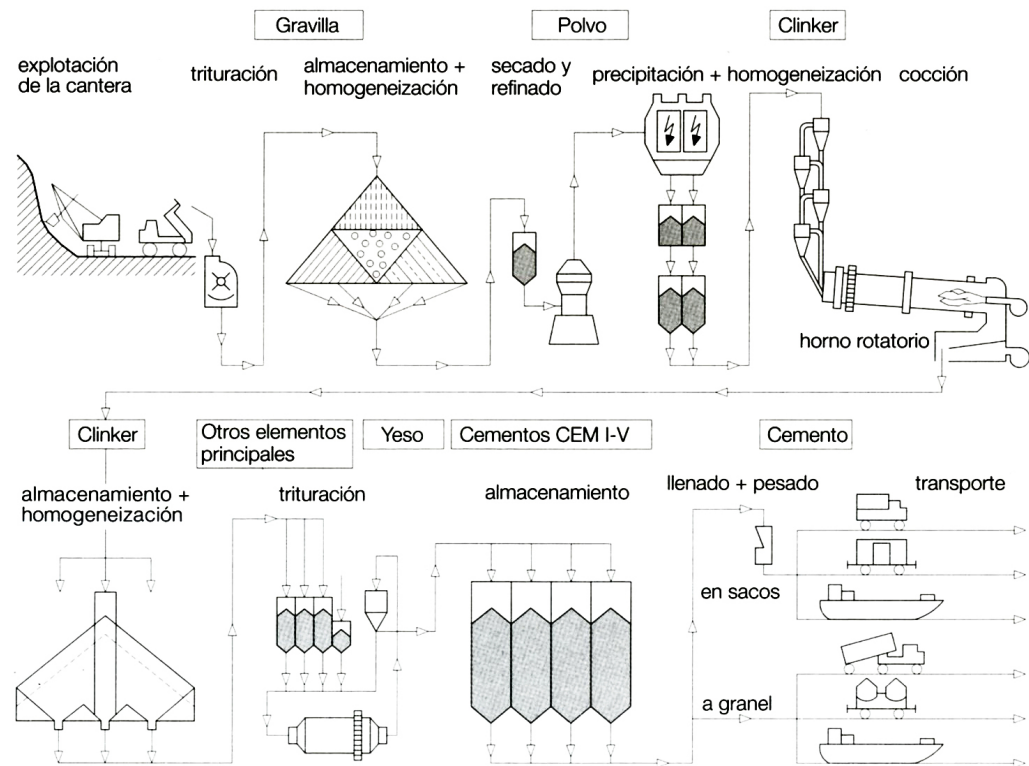


Imagen 18 _ Fabricación de Clinker. [16]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

Cementos y composición

Principales tipos de cemento	Nombre	Designación	Componentes principales (proporción en masa, %)										Componentes secundarios ^{1, 2}
			Clinker de cemento portland	Escoria de alto horno granulado	Microsilice	Puzolana natural	Puzolana natural calcinada	Cenizas volantes silíceas	Cenizas volantes calcáreas	Esquistos calcinados	Caliza	Caliza	
			K	S	D	P	Q	V	W	I	L	LL	
CEM I	Cemento portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento portland con escoria de alto horno	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5
	Cemento portland con microsilice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento portland con cenizas volantes	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento portland con esquistos calcinados	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento portland mixto ³	CEM II/A-M	80-94	←-----→					6-20	-----→			0-5
		CEM II/B-M	65-79	←-----→					21-35	-----→			0-5
CEM III	Cemento con escoria de alto horno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico ³	CEM IV/A	65-89	-	←-----→			11-35	-----→			0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←-----→			36-55	-----→			0-5	
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A	40-64	18-30	-	←-----→		18-30	-----→		-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←-----→		31-50	-----→		-	-	0-5

¹ Los valores de la tabla se refieren al total de los componentes principales y secundarios (exceptuando el sulfato de calcio y los aditivos del cemento).

² Las sustancias añadidas al cemento como componentes secundarios no deberían estar presentes en el cemento como componentes primarios.

³ El contenido de microsilice está limitado al 10 %.

El cemento obtenido de esta manera, se lo denomina convencionalmente Portland. Su composición básica es: Silicatos Bicálcico (SC₂)¹³ y Tricálcico (SC₃)¹⁴, Aluminato Tricálcico (AC₃)¹⁵ y Aluminio-Ferrito Tetracálcico (AFC₄)¹⁶, además de otros compuestos en proporciones muy bajas [32]. Estos componentes tienen la capacidad de hidratarse en presencia de agua, lo cual será descrito más adelante.

Tipos de Cementos

Actualmente los cementos españoles están regulados según la Instrucción RC-08 (Instrucción para la Recepción de Cementos) y por las Normas UNE conforme la norma europea EN-197 [33].

Existen varios tipos de cementos, empezando por el cemento portland puro u ordinario (designación europea CEM I), el cual contiene un 95% de Clinker con un mínimo de adiciones, hasta el CEM V un cemento compuesto con tan solo un 20-40% de Clinker y el resto adiciones. A continuación se muestra en la Tabla 3 los distintos tipos de cementos.

Tabla 2 _ Tipos de Cementos y composición.

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

Hidratación del Cemento

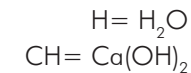
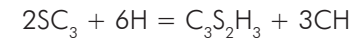
El cemento tiene la capacidad de hidratarse en presencia del agua y formar cristales en formas anfractuosas que generan una traba muy estrecha entre sí y los materiales inertes que encuentra a su alrededor. Dependiendo del tamaño de los materiales inertes adquiere el nombre de Hormigón (arenas y gravas), Mortero (arenas) y Pasta de Cemento (cuando carece de ellos).

Fernández en su libro "Hormigón"[10], describe la hidratación del cemento de la siguiente manera:

Aunque las reacciones se dan en un mismo espacio y e inician al mismo tiempo y provocando interacciones que entre ellos, se analizan por separado. Las reacciones más importantes son las del Silicato Tricálcico y la de Aluminato Tricálcico, por lo que sólo se citarán las de estos dos componentes [11].

- Silicato Tricálcico(SC₃): Reacciona de manera rápida con el agua y genera dos compuestos:
 - Tobermorita o Silicato de Calcio Hidratado = C₃S₂H₂

- Portlandita o Hidróxido de Calcio = Ca(OH)₂



- Aluminato Tricálcico (AC3): aunque su cantidad es reducida en el cemento, comparada con los silicatos, su relación con otras fases es sumamente importante. Su reacción es rápida, y brinda el primer fraguado a la mezcla.

El aluminato tricálcico, en presencia de la portlandita (generada anteriormente por los silicatos), forma aluminatos hidratados que cristalizan hexagonalmente:



Para evitar un fraguado muy rápido se añade yeso hidratado (CaSO₄ · 2H₂O, escrito de manera simplificada

13 SC₂ = 2 CaO.SiO₂_ (contribuye con la resistencia inicial)

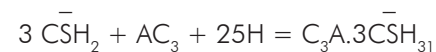
14 SC₃ = 3 CaO.SiO₂_ (contribuye con la resistencia a largo plazo)

15 AC₃ = 3 CaO.Al₂O₃_ (contribuye con la resistencia inicial y acelera la velocidad de fraguado)

16 AFC₄ = 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃_ (contribuye con el color gris del cemento, acelera el fraguado y los óxidos de hierro actúan como fundentes)[55]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

CSH₂) al final de la molienda del Clinker. Ahora el yeso y el aluminato forman sulfoaluminato de calcio hidratado insoluble o sal de Candlot:



El aluminato tricálcico, tiene poca influencia en la dureza final del compuesto, sin embargo es necesario para un primer fraguado y durante la fabricación del Clinker.

A manera de resumen, el hidróxido de calcio Ca(OH)₂, obtenido por la reacción de los silicatos con el agua, es una base o álcali, esto quiere decir que tiene un pH elevado. Como se verá más adelante (Durabilidad de la fibra vegetal en los compuestos cementíceos), la portlandita afecta directamente a la durabilidad de los VFRCC, debido a la degradación de la fibra vegetal.

2.3.1.3. Áridos

El tamaño de árido influye directamente en la adherencia entre la fibra y la matriz, especialmente cuando se trata de fibras cortas y delgadas. Un árido más fino tendrá mejor adherencia y generará menos y más pequeños poros, evitando una reducción en el área de contacto entre la matriz y el refuerzo.

Como se mencionó en las Características de la Matriz, el tamaño máximo de árido admitido debe ser pequeño. Inicialmente, algunos estudios trabajaban con áridos no tan finos, como Savastano Jr. en "The use of coir fibre as reinforcement to portland cement mortars" [7] quien usa un modulo de finura de 2,2 mm, ó artículos como el "Hormigón con refuerzo textil" de Schätske y Schneider [12] que mencionan un tamaño máximo de árido recomendado de 1 mm. Sin embargo, hoy en día los áridos usados son más pequeños aún, se utilizan algunos como el microsílíce, cenizas volantes y productos similares [12], es decir, con una granulometría similar a la del cemento portland ordinario (2 a 200 μm).

Se debe tener en cuenta, que a menor grado de finura de las partículas, se requiere mayor cantidad de aglomerante [12].

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

También es común no usar áridos, como lo hacía antiguamente el asbesto-cemento [34].

2.3.1.4. Relación agua / cemento

Según Pellicer y col. [32], la cantidad mínima de agua requerida para la hidratación del cemento, es un 23,5% del peso del cemento, es decir una relación 0,235/1 (agua, cemento). A partir de ello debemos considerar la cantidad de agua que absorberá la fibra, en caso que la usemos seca, el porcentaje de absorción del árido y un porcentaje de agua que nos ayude con la homogeneidad y trabajabilidad de la mezcla.

Savastano, Jr. [7] recomienda una reducida relación A/C (agua/cemento), en su estudio "The use of coir fibre as reinforcement to portland cement mortars" utiliza una relación A/C de 0,75 sugiriendo tratar de bajar este valor.

2.3.1.5. Aditivos

Para tener una mezcla homogénea, con buena trabajabilidad sin aumentar la relación agua cemento, es necesario utilizar aditivos, ya sea plastificante o súper-plastificante.

Su modo de actuación es como lubricantes de la pasta, individualiza los granos de cemento, favoreciendo su deslizamiento y evitando la formación de grumos. En la mezcla general, disminuye la tensión superficial del agua, por tanto con la misma relación A/C se obtiene mayor plasticidad [32].

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

32

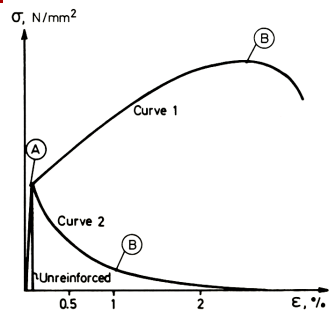
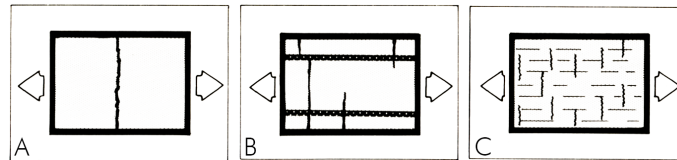


Imagen 19 _ Curva típica de resistencia a flexión. [35]. Curva 1: Compuesto reforzado con fibras vegetales. Curva 2: Compuesto con envejecimiento acelerado, reforzado con fibras vegetales. Curva 3: Compuesto sin refuerzo.

Imagen 20 _ Esquema de una matriz reforzada. A. Sin refuerzo B. Reforzada por varillas V. Reforzada por fibras. [25]

2.3.2. Refuerzo: Fibras vegetales



Desde su inicio las fibras en general, y en especial las fibras vegetales, han estado ligadas mayoritariamente al área textil, con muy poca aplicación en la construcción. En la a Tabla 3 se puede observar como más del 60% tienen un uso textil o similar [5]. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, hace pocos años atrás nace nuevamente el interés a este material.

El principio básico de reforzar, es transmitir esfuerzos a las fibras, de manera que hagan de sostén y distribuyan mejor las

cargas de tensión del compuesto a través de su anclaje con la matriz, logrando una especial mejora en el comportamiento post-agrietamiento [6]. Esto se traduce en una mayor resistencia a flexión, mejorando el Módulo de Rotura (MOR).

Las fibras dentro de la matriz no evitan la formación de grietas, como muchas veces se piensa. Simplemente, al distribuir mejor las cargas, ayudan a disminuir el ancho de las grietas que se forman [26]. Como se observa en la Imagen 20 (A), si aplicamos una carga a una matriz sin refuerzo, la concentrará en un solo punto, creando una única grieta, gruesa, que divide el material en dos partes. Una matriz con refuerzo tipo armadura (B), adquiere cierta ductilidad, se generan más grietas, pero más delgadas, pues la carga se encuentra mejor distribuida que en el caso anterior. Finalmente en la imagen (C), la matriz reforzada con fibras, presenta mayor cantidad de grietas que todas las anteriores y a su vez más finas, el material presentará mayor deformación al aplicar una carga.

Por otro lado, la adhesión de fibras a la matriz no afectan la estanqueidad del material. Algo que sí puede hacerlo es la relación A/C, al verse incrementada para mejorar la trabajabilidad de la mezcla en fresco [26].

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

Common names of fibre or plant	Plant		Present uses of fibres	Observations
	Botanical name	Fibrous part		
Bamboo	<i>Bambusa vulgaris</i> Schrad.	Stalk	Paper, building	Shredding very difficult (7); used as sticks in buildings
Coir, coco	<i>Cocos nucifera</i> Linn.	Fruit	Textiles, ropes, upholstery, brushes	Low strength
Cotton	<i>Gossypium herbaceum</i> Linn.	Seed	Textiles	Expensive
Cellulose	<i>Pinus eliottii</i> and <i>Eucalyptus citriodora</i>	Stalk	Paper	Fibres from dissolved paper (8)
Dishcloth gourd, vegetable sponge, esponjilla	<i>Lufa aegyptica</i> Mill.	Fruit	None	Good durability, difficult to separate fibres (7)
Elephant grass	<i>Pennisetum purpureum</i> Schum.	Leaf	None	African species have good strength and durability (9), difficult to mix in the matrix
Flax, 'linho'	<i>Linum usitatissimum</i> Linn.	Stalk	Textiles	High durability for textile purposes (10), expensive
Henequen, maguey	<i>Agave fourcroydes</i> Lemaire	Leaf	Textiles, brushes	Similar to sisal, lower strength (10)
Jute	<i>Corchorus capsularis</i> Linn.	Stalk	Textiles, sacking	High strength, low durability (see. ref. 11)
Kenaf, brown Indian hemp	<i>Hibiscus cannabinus</i> Linn.	Stalk	Textiles, ropes	Similar to jute, with slightly lower strengths (10, 12)
Malva, Congo jute, paka, 'malva roxa'	<i>Urena lobata</i> Linn.	Stalk	Textiles, sacking	Strengths similar to jute (10)
Manila hemp, abaca	<i>Musa textilis</i> Née.	Leaf	Ropes, paper	Salt-water resistant but slightly acid (10)
Phormium, New Zealand flax	<i>Phormium tenax</i> Forster	Leaf	Textiles, ropes	Salt-water resistant, high strength, available only in Argentina and Brazil (12)
Piassava	<i>Attalea funifera</i> Mart.	Leaf	Ropes, brushes and brooms	Not flexible, thick
Plantain	<i>Musa sapientum</i> Linn.	Leaf	None	Low durability (9)
Ramie	<i>Boemmiria nivea</i> Gaud.	Stalk	Textiles	Very high strength, not affected by humidity (12), expensive
Sisal	<i>Agave sisalana</i> Perrine	Leaf	Textiles, ropes, pulp	High strength, low durability (13)
Sugar cane	<i>Saccharum officinarum</i> Linn.	Stalk	Pulp	Use of bagasse, difficult to remove remaining sugar (7)
Sunn-hemp	<i>Crotalaria juncea</i> Linn.	Stalk	Pulp	Small production, high durability (11)

17 Las fibras que se muestran resaltadas, serán utilizadas para la Campaña Experimental.

Tabla 3_Prospectiva de las Fibras Vegetales¹⁷. [5]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

18 Fibras usadas como refuerzo en materiales principalmente de construcción.

2.3.2.1. Clasificación de las fibras

Dentro del campo de las fibras, existe gran variedad, por lo que este trabajo de investigación se centra a un grupo en particular.

La Imagen 21, creada a partir de la adaptación de dos clasificaciones, Fördös, Rehsi S.S. y col, Aguedo y col. [25], [28], [36], muestra la Clasificación de las Fibras¹⁸ según su Origen. En este trabajo, hablaremos exclusivamente de las fibras naturales de origen vegetal provenientes de plantas no maderables.

Descartamos las fibras elaboradas por el hombre, pues la gran mayoría requieren procesos muy complejos para su obtención, en ocasiones poco sustentables y con costos muy elevados. Por otro lado, se descartan las fibras de fuente animal y mineral, ya que provienen de fuentes no-renovables. Y finalmente, dentro de las fibras de origen vegetal, descartamos las fibras derivadas de la madera, pues como menciona Aguedo y col. [28] las fibras maderables por si solas constituyen un excelente material de construcción y han sido suficientemente explotadas; además César Reyes [37] en su tesis doctoral comenta, que hoy en día el consumo de madera supera su producción, poniendo en peligro el uso de este material en el futuro.

Por otro lado, podemos clasificar las fibras por su forma y método de aplicación dentro de un compuesto.

Según la bibliografía revisada, la mayoría de estudios utilizan fibras cortas o pulpa, coladas en la matriz de forma aleatoria. Se logra incorporar hasta un máximo de 10 % de fibra, pues pasado cierto límite la fibra tiende a formar grumos y generar una mala distribución dentro del compuesto.

Por otro lado, en minoría, están los estudios que usan fibras largas, colocadas algunas veces por capas dentro de la matriz, de forma de tiras alineadas o como una estructura textil. Los más comunes son los textiles no-tejidos, donde las fibras son distribuidas aleatoriamente, los textiles tejidos son poco usados.

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

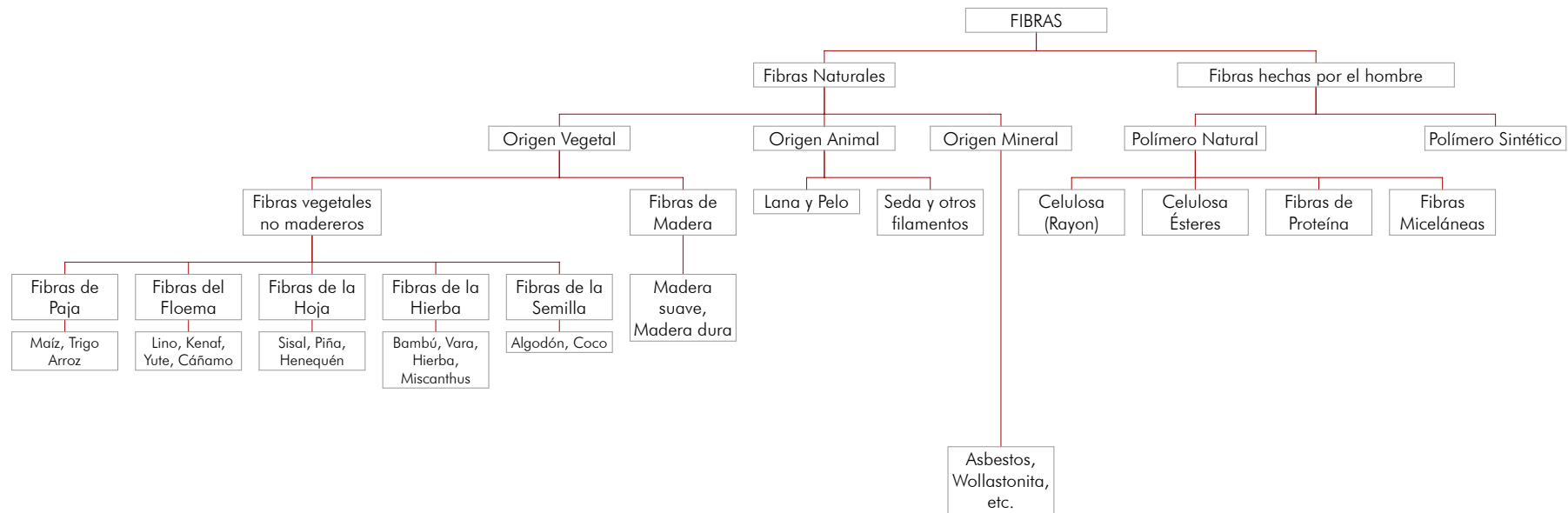
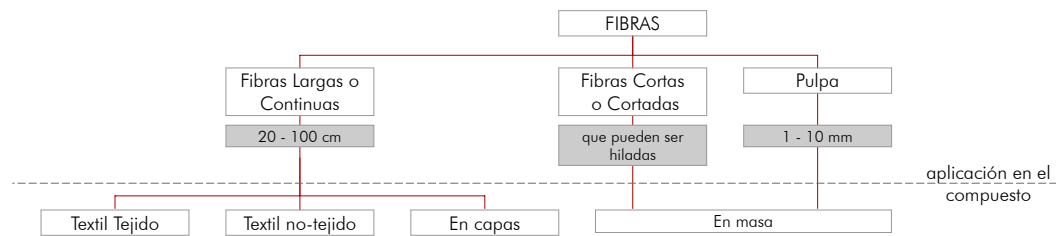


Imagen 21_ Clasificación de las Fibras según su origen. Adaptación de [25], [28], [36]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

36



2.3.2.2. Características de las fibras vegetales

Las características de las fibras varían según la especie, clima, tipo de suelo, tipo de extracción e inclusive la época del año en la que fueron cortadas.

Muchas de las fibras que han sido usadas en estudios de distinta índole, provienen de sembríos no controlados, algunos hasta “salvajes”, por ello vemos valores con mucha dispersión en los ensayos. Se ha observado casos donde fibras del mismo lugar, con igual forma de extracción y procesamiento, presentan un alto grado de variación en sus propiedades intrínsecas [5]. Más adelante veremos como esto sucede en la campaña experimental.

Cabe destacar la parte de la planta de donde se obtienen las fibra, ya que afecta directamente a las propiedades de la misma. Generalmente las fibras procedentes del tallo son las más largas, vienen en forma de hebras y poseen buena flexibilidad. Las fibras provenientes de las hojas son más rígidas y gruesas. Finalmente, las fibras de las semillas o frutos son cortas pero mas resistentes al álcalis [5].

Imagen 22 _ Clasificación de las Fibras según su Forma

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

Fibre	Colour	Texture	Specific gravity	Water absorption (24 h), %	Tensile strength (kg/mm ²)	Modulus of elasticity (GN/m ²)	Elongation at break (%)	Electrical resistivity ($\times 10^5 \Omega \text{ cm}$)
Coir	Golden brown	Smooth and tough cylindrical and twisted fibre	1.31	80	9–14	4–6	15–40	9–14
Sisal	Dirty white	Long, rough and twisted fibre	1.35	150	100–200	34–62	3–7	4.7–5.0
Jute	Light yellow	Soft and resilient fibre	1.36	250	400–500	17.4	1.1	—
Bamboo	White to light yellow	Smooth to rough fibre	1.50	—	—	—	—	—
Banana	Light yellow to light brown	Smooth to rough, long cylindrical fibre	1.30	400	110–130	200–510	1.8–3.5	6.5–7.0
Aak	Dirty white	Soft, cotton-like	1.17	350	74–87	—	—	—
Bhabar	Dirty green	Rough and brittle fibre	1.30	185	5–70	—	—	—
Castor	Slaty white	Short crumbled soft fibre	1.01	235	25–40	—	—	—
Dhakala	Yellowish white	Bundle of soft fibres	1.06	120	40–85	—	—	—
Hemp	Light yellow	Soft and resilient fibre	1.36	140	40–200	—	—	—
Munja	Creamy yellow	Hard and brittle fibre	1.29	160	20–75	—	—	—
Shinio	Greyish white	Short, rough crumbled and twisted fibre	0.94	230	30–55	—	—	—
Khimp	Dirty yellow	Short bundle like cotton lint	1.33	450	60–65	—	—	—
Pineapple leaf	Creamy white	Soft with pointed ends	1.44	—	360–740	24.3–35.1	2.0–2.8	—
Palmyrah	Yellowish	Stiff, thick, strong	—	—	180–215	4.4–6.1	2.0–2.8	—

19 Ibídem.

Tabla 4_Propiedades físicas de algunas Fibras Vegetales¹⁹. [36]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

20 Ibídem.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ALGUNAS FIBRAS VEGETALES							
PLANTA	TIPO DE FIBRA	DENSIDAD	RESISTENCIA A TRACCIÓN	MÓDULO DE YOUNG	ALARGAMIENTO A LA ROTURA	RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA TENSIÓN	MÓDULO ESPECÍFICO
		gr/cm ³	MPa	GPa	%	GPa por gr/cm ³	GPa por gr/cm ³
Cáñamo	Tallo	1,47	690	70	1,6	0,47	47,6
Lino	Tallo	1,5	345 - 1500	27,6	2,7 - 3,2	0,23 - 1,0	18,4
Yute	Tallo	1,3 - 1,45	393 - 800	13 - 26,5	1,16 - 1,5	0,30 - 0,62	10,0 - 20,4
Ramio	Tallo	1,5	400 - 938	61,4 - 128	1,2 - 3,8	0,27 - 0,63	40,9 - 85,3
Sisal	Hojas	1,45	468 - 640	9,4 - 22,0	3 - 7	0,32 - 0,44	6,48 - 15,2
Algodón	Semillas	1,5 - 1,6	287 - 800	5,5 - 12,6	7,0 - 8,0	0,19 - 0,53	4,67 - 5,33
Coco	Fruto	1,15	131 - 175	4,0 - 6,0	15 - 40	0,11 - 0,15	3,48 - 5,22
Fibra de Vidra		2,55	3400	73	2,5	1,33	28,6

Tabla 5 _ Propiedades físicas y mecánicas de algunas Fibras Vegetales²⁰. [28]

En las Tablas 4 y 5 se puede observar la dispersión que hay entre los valores de una misma fibra, en muchos casos se debe a su procedencia, forma de obtención, etc.

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

Ventajas y Desventajas del uso de fibras vegetales

Entre las ventajas y desventajas del uso de las fibras vegetales están [6], [7], [31], [37], [38]:

Ventajas:

- Bajo peso específico, que se traduce en mayor resistencia específica que otras fibras como las de vidrio, especialmente a sollicitaciones de flexión.
- Alta resistencia a la tracción y deformación. Gracias a ello brindan al compuesto una elevada ductilidad muy recomendable para admitir cargas dinámicas o accidentales de impacto.
- Constituyen un recurso renovable, con poco consumo de energía para su elaboración, lo que las convierte en materiales amigables al medio ambiente.
- Gracias a su naturaleza hidrofílica las fibras vegetales son ideales para matrices hidráulicas.
- Proporcionan buenas propiedades térmicas, acústicas y aislantes.
- Pueden obtenerse mediante inversiones de bajo costo, lo que permite su desarrollo industrial en países en vías de desarrollo.

- En general el método de obtención es inocuo y no representa riesgos para los manufactureros.
- Costo económico bajo.

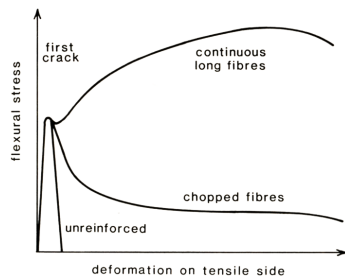
Desventajas:

- Alta dispersión en sus propiedades, dependiendo de factores como el clima o el método de obtención.
- Alta absorción de agua, llegando a valores que sobrepasan el 100% en una hora de inmersión. Esto produce importantes variaciones de peso y volumen, afectando su durabilidad y resistencia mecánica.
- Bajo módulo elástico.
- Mala durabilidad en un medio alcalino.
- En general tienen baja resistencia al fuego.
- Falta de continuidad en los suministros y disponibilidad (dependiendo del tipo de fibra).

De las desventajas descritas, una de las más importantes es la baja resistencia al álcali, que conlleva a un deterioro relativamente rápido de la fibra en una matriz con base de cemento. La descomposición que sufre la celulosa, hemicelulosa y lignina por reacción con el hidróxido de calcio, disminuye en gran medida el refuerzo proporcionado por la

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

40



fibra hasta prácticamente anularlo [36]. Más adelante se analizará este tema en la Durabilidad de la Fibra Vegetal dentro de una Matriz Cementícea.

2.3.2.3. Longitud y volumen de fibra incorporada

Las propiedades de un compuesto se ven influenciadas directamente por el tipo de matriz, el tipo de fibras, su largo y volumen incorporado. De la misma forma, su trabajabilidad varía cuando las fibras son agregadas.

Gram [26], en su estudio con fibras de sisal en un compuesto cementíceo, comenta que a mayor cantidad de fibras se usaba, se requería mayor cantidad de agua para mantener la misma trabajabilidad de la matriz, ya que la fibra misma absorbe una parte de ella.

Longitud de la Fibra

Como se mencionó en la clasificación de las fibras, tenemos “tres tamaños” que pueden ser aplicados a los compuestos: largas, cortas y pulpa.

Si observamos la Imagen 23, en el estudio realizado por Gram [26] con fibras de sisal, las tres curvas (de Tenso-Deformación) son iguales hasta la primera grieta (límite de proporcionalidad), tanto si tienen refuerzo como si no lo tienen. Y a partir de este punto, los valores varían considerablemente entre una curva y otra. Los compuestos reforzados con fibras vegetales tienen mayor área bajo la curva, principalmente los reforzados con fibras largas. Esto significa que la tenacidad y la resistencia al impacto de los compuestos reforzados han incrementado, especialmente del segundo (fibras largas).

Otro estudio realizado por Guimarães [34], donde usó técnicas especiales para que la fibra de sisal pueda ser orientada fácilmente sin enredarse o formar haces, obtuvo mejores resultados cuando la relación de aspecto de la fibra es mayor (largo/ancho), con ciertos límites impuestos por el volumen de fibra en el compuesto.

Lo que se consigue al usar fibras largas, es una mayor adherencia de la fibra con la matriz, pues se tiene mayor área de contacto [7]. La adherencia entre la interfaz del refuerzo y la matriz es sumamente importante, a mayor adherencia mejoran las propiedades mecánicas del compuesto. Se debe procurar

Imagen 23 _ Comportamiento Deformación-Tensión para compuestos no-reforzado, reforzado con fibras naturales cortas y largas. [26]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

que cada fibra este rodeada completamente por la matriz sin “vacíos” que disminuyan el área de contacto. Bajo este criterio, las mejores fibras para reforzar un compuesto son las fibras largas, teniendo especial cuidado en su distribución dentro del compuesto para evitar la formación de grumos.

Este inconveniente encontrado con las fibras en general, pero en especial con las fibras largas, es su “enredamiento” o “formación de grumos” en el momento de mezclado (Imagen 24), evitando una distribución isotrópica y buena trabajabilidad de la mezcla fresca. Esto sucede cuando las fibras son incorporadas en masa y en mayor volumen. Las fibras delgadas y cortas se enredan menos que las fibras largas y gruesas. Gracias a ello es posible agregar un mayor volumen de fibras cortas o en pulpa, que fibras largas (Imagen 25).

Para mejorar la distribución de fibras largas en un VFRCC, el estudio de Claramunt y col. [40], usando “Estructuras no-tejidas de fibras naturales como refuerzos para compuestos de cemento de elevada ductilidad”, es un buen ejemplo. Realizan pruebas con textiles no-tejidos de distintos gramajes, y a la vez se hace una comparativa entre dos compuestos preparados bajo las mismas condiciones: el primero con textiles no-tejidos;

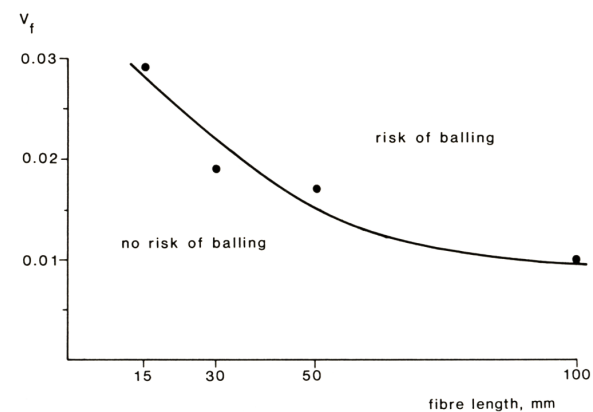
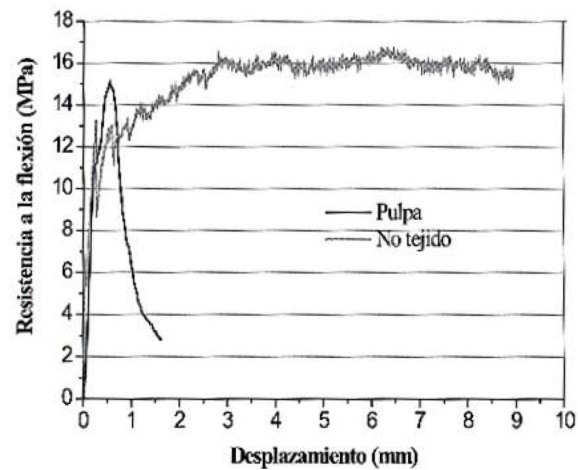


Imagen 24 _ Grupo de fibras largas de cáñamo en un compuesto cementíceo. [39]

Imagen 25 _ Ensayo de evaluación visual, realizado con fibras de sisal con tendencia al enredo. [26]

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

42



en la Imagen 26 que las curvas típicas del ensayo de resistencia a flexión. La diferencia entre las dos se debe a la velocidad de transferencia de esfuerzos entre la fibra y la matriz: el compuesto con pulpa traspasa de manera mucho más rápida las cargas, que los no-tejidos.

Imagen 26 _ Curvas típicas esfuerzo-deformación para los compuestos reforzados con las estructuras no-tejidas comparados con los reforzados con pulpas. [40]

Volumen de Fibra

El máximo de fibra que se puede incorporar a un compuesto

dependerá de la forma de fabricación del compuesto y a su vez del tipo de fibra.

Algunos estudios analizan la variación de volumen de fibra en los VFRCC, como el realizado por Quiñonez en Guatemala, en el cual realiza paneles corrugados de cubierta, similares a los de asbesto-cemento muy comunes en Latinoamérica. El autor analiza el efecto de la matriz, largo y volumen de la fibra en las propiedades del compuesto. En su estudio observa el comportamiento con el uso de volúmenes superiores al 2% y largos de fibra de 4, 15, y 100 cm. de henequén [5]. Sin embargo, no se menciona con respecto a que se obtiene este porcentaje, si al total del compuesto o al total del aglomerante.

Claramunt y col. [31] incorporan hasta el 4% de pasta kraft con respecto al peso total del conjunto (cemento + árido), en su estudio "The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites". Y si nos remontamos a su antecesor el fibrocemento de asbesto-cemento, utilizaba el 10% de fibra del total del compuesto.

A mayor cantidad de fibra incorporada, el compuesto será menos denso y más dúctil.

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

2.3.2.4. Estructura de la fibra vegetal

Según Claramunt [11], las fibras vegetales se encuentran formadas de la siguiente manera:

- Cadenas de celulosa: estas cadenas de celulosa pueden agruparse de dos maneras para formar las micelas:
 - o Ordenadas: se concentran de manera paralela entre sí, y presentan mejor resistencia mecánica.
 - o Desordenadas: con desorientación en las cadenas, se las llama también zonas amorfas. Tienen menor resistencia mecánica y son más sensibles al ataque químico.
- Las micelas se agrupan de manera ordenada, en microfibrillas.
- Las microfibrillas a su vez se concentran paralelamente en macrofibrillas.

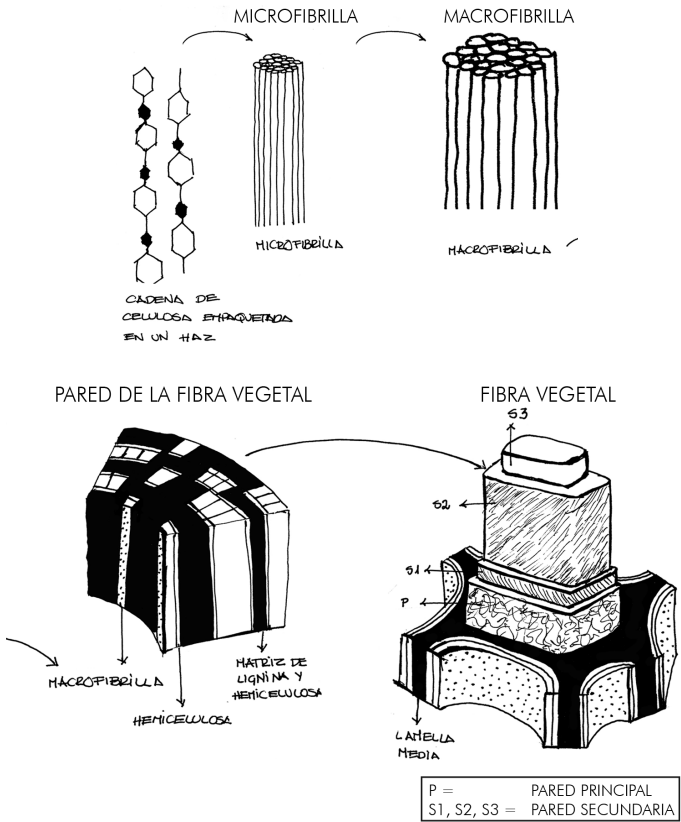


Imagen 27 _ Estructura de una fibra de vegetal. (Fuente Propia)

2.3. Materiales que intervienen en los compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

44

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Humedad (%)
Cáñamo ^a	1,48	88-90	7-10	1,5-2,0	3,5-8,0
Sisal	1,45	65	12	9,9	10
Plátano ^b	1,35	63-64	19	5	10-11
Piña ^b	1,53	81	-	12,7	13,5

• Las microfibrillas pasan a formar las paredes de la fibra vegetal. Cada una de estas microfibrillas están unidas entre sí gracias a unos polímeros naturales que actúan de “pegantes” [41]:

- o Lignina
- o Hemi-celulosa
- o Pectina
- o Extensina.

Estos polímeros son afectados por el calor, la alcalinidad, disoluciones ácidas, etc., reduciendo su durabilidad y por ende su capacidad de refuerzo.

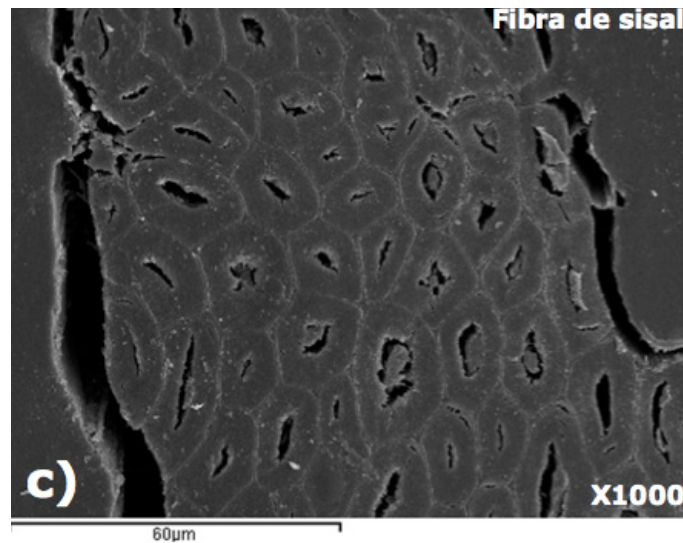


Tabla 6 _ Propiedades físicas de las fibras.
[42]
Imagen 28 _ Estructura de una fibra de Sisal. [42]

2.4. Durabilidad de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

2.4.1. Durabilidad de la fibra vegetal dentro de una matriz cementícea

El uso de las fibras vegetales como refuerzo tiene un punto débil y es su durabilidad.

La alcalinidad de la matriz y la inestabilidad de las fibras son la principal causa de la pérdida de resistencia del compuesto [31].

Éste es tal vez el principal problema por el cual hoy en día no encontramos muchos productos como estos en el mercado.

Las fibras por si solas son un material sensible al ataque de microorganismos, pero al encontrarse dentro de una matriz quedan protegidas, (siempre y cuando no exista una grieta o falla en el panel que permita su ingreso).

El mayor problema se da por la alcalinidad de la matriz. Un estudio realizado en 1979 por el Instituto de Investigación del Cemento de Suecia[43], tras tres años investigación para mejorar la durabilidad de los VRFCC, utilizando fibras de sisal, concluyeron que los mejores resultado se obtenían al reducir la alcalinidad de la matriz, mediante el remplazo parcial del cemento portland ordinario con una puzolana altamente reactiva.

Como sabemos todos los compuestos que utilizan cemento como base, tienen un pH elevado, es decir, son altamente alcalinos (aproximadamente 12,4pH) [44]. Algunos autores como Gram[26] comentan que la alcalinidad del poro de agua de la matriz, deteriora la fibra a un grado tan elevado que llega incluso a anularla por completo. Por el contrario, cuando un compuesto pasa por el proceso de carbonatación, las fibras se mantienen intactas conservando sus cualidades.

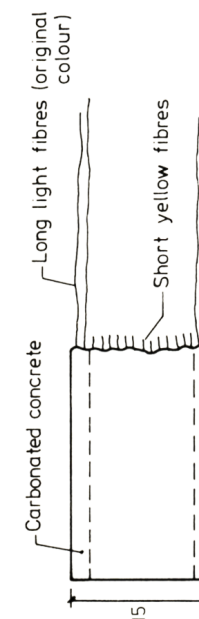
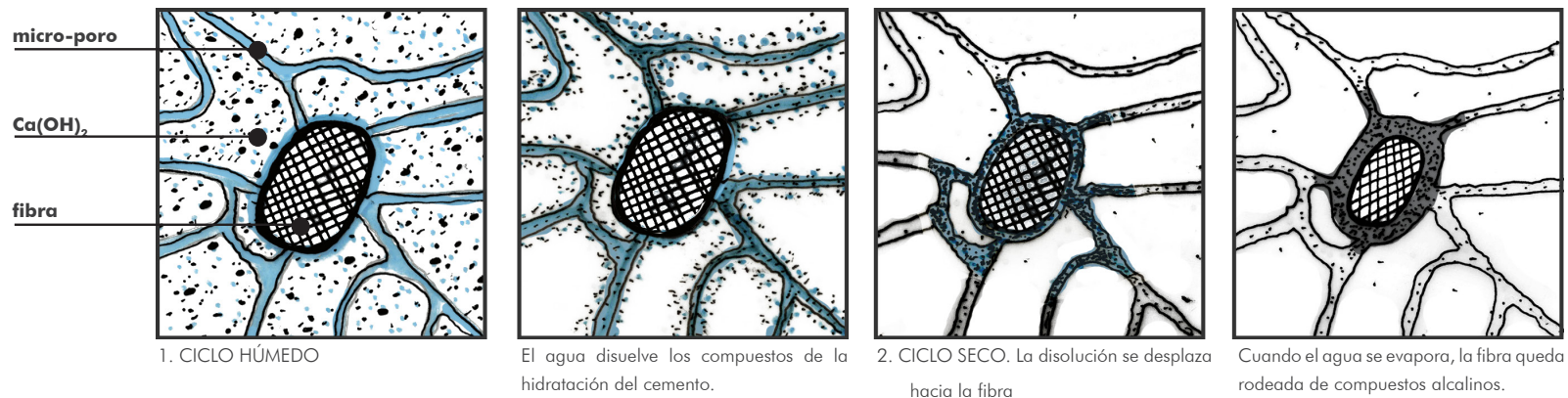


Imagen 29 _ Esquema de rotura de un panel de techo realizado en Tanzania con 10 meses de envejecimiento a la intemperie. Capas exteriores están carbonatadas, mientras que el interior no lo está. Fibras exteriores conservan sus propiedades, mientras que las interiores las han perdido. [35]

2.4. Durabilidad de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

46



Proceso de deterioro de la fibra en un medio alcalino

Varios autores entre ellos Gram[35] relacionan la presencia del hidróxido de calcio (CH) con la descomposición de la fibra y pérdida de la resistencia mecánica.

Este proceso se da especialmente cuando el compuesto es sometido a ciclos seco-húmedos, ya sea en laboratorio o por envejecimiento natural en un ambiente al exterior, pero también por variaciones de la humedad relativa del ambiente.

En "The hornification of the vegetable fibres improve the durability of the cement mortars composites" Claramunt y col.

[31] asumen el siguiente modelo de descomposición de la fibra:

- Primero Ciclo Seco. La sección transversal de la fibras disminuye, a consecuencia de la pérdida de agua. Esto causa una falta de adherencia entre la fibra-matriz, y es aquí cuando empiezan a aparecer unos "espacios vacíos" o "huecos" en la interfaz.
- Primer Ciclo Húmedo. Los compuestos fruto de la hidratación del cemento (como el hidróxido de calcio) se disuelven en el agua formando una disolución. Las fibras vegetales absorben la disolución.

Imagen 30 _ Esquema del proceso de deterioro de la fibra.
(Fuente Propia)

2.4. Durabilidad de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

- Segundo Ciclo Seco. En primer lugar se evapora el agua del compuesto y posteriormente el agua contenida en la fibra. Por tanto, la disolución se desplaza hacia las fibras, depositando el hidróxido de calcio sobre la superficie y lumen de las fibras.
- Ciclos siguientes. Este proceso se repite una y otra vez, produciendo un bombardeo de hidróxido de calcio sobre las fibras vegetales. Este ataque causa la densificación de la superficie y lumen de las fibras con productos altamente alcalinos, generando la disminución de su resistencia mecánica.

Este desplazamiento de los iones de OH^- y Ca^{2+} , es lento en condiciones estables, pero en ciclos seco-húmedos se acelera²¹. Gram [35], realiza un experimento interesante, y somete los especímenes a:

- Ambiente Seco (2 años): Temperatura de 20°C, 50% de Humedad Relativa.
- Inmersión en Agua (2 años): Temperatura 50°C.
- Ciclos Seco-húmedos (2 años): 3 semanas en ambiente seco (20°C-50%HR). 1 semana en inmersión en agua (20°C).

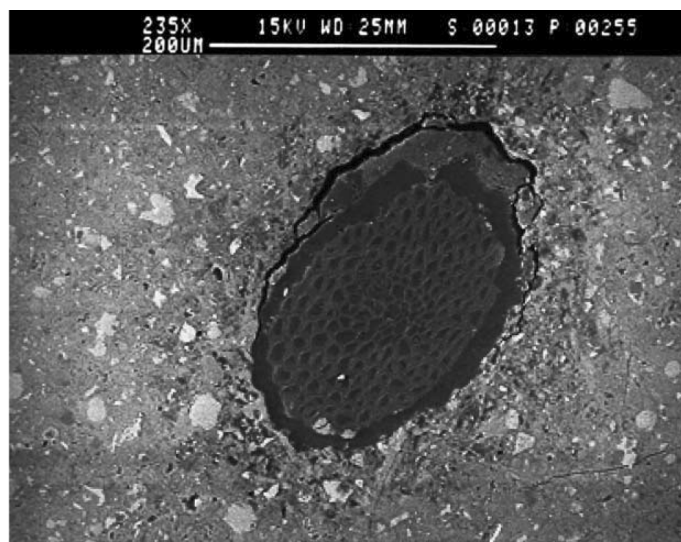


Imagen 31 _ Zona de transición de una fibra de coco en un compuesto cementíceo. [29] . [29] . Al elaborar el compuesto la fibra absorbe agua, por tanto se hincha, se puede asumir el “desprendimiento” de la matriz a la contracción que sufre cuando el compuesto se endurece y pierde agua.

21 Como se menciona en la Estructura de la Fibra Vegetal, está formada por cadenas de celulosa. Cuando la fibra es sumergida en una solución alcalina (con contenido de OH^-), los iones de OH^- se incorporan a la celulosa y forma un ácido isosacárico, mientras que cuando la fibra se seca, la celulosa vuelve a su estado original. Sin embargo, cuando la solución alcalina contiene también iones de Ca^{2+} , estos se unen a los extremos del compuesto ácido, rompiendo las cadenas de celulosa cuando la fibra se seca. Es por esta razón que el Hidróxido de Calcio afecta en especial a las fibras vegetales, mientras que el Hidróxido de Sodio no lo hace.

2.4. Durabilidad de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales

líquida. Una vez disueltas la lignina y hemi-celulosa, se rompe el vínculo entre cada celda de la fibra y disminuye su capacidad de absorber esfuerzos, siendo este el principal cambio de las características de la fibra. Finalmente el lumen de la celda es llenado con hidróxido de calcio y pierde su flexibilidad [35].

El estudio de la durabilidad de las fibras de John y col.[38], muestra el antes y después de fibras de coco sometidas a una solución alcalina por 118 días. La superficie de las fibras cambian debido a la reacción del hidróxido de calcio con la lignina en un medio acuoso.

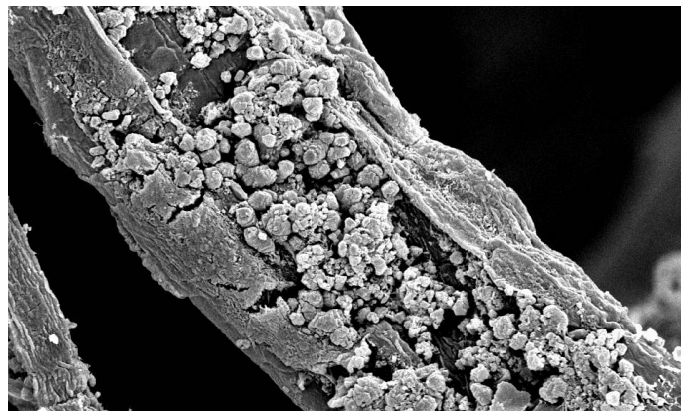
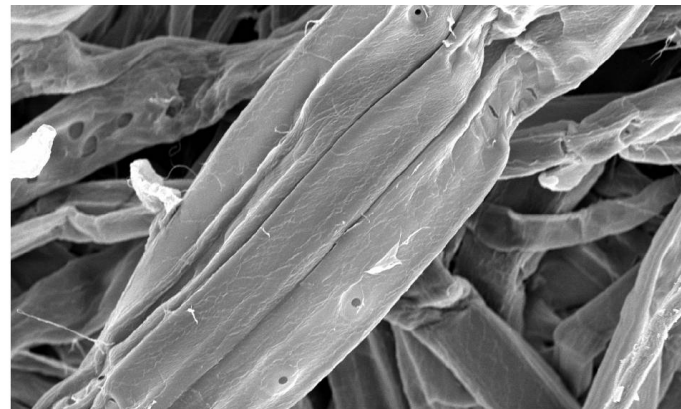


Imagen 34 _ Fibra de pulpa de conífera. Sin tratamiento de envejecimiento y con envejecimiento, durante 4 meses y 4 ciclos seco-húmedos en contacto con el cemento, se observa depósitos de CH. [20]

2.5. Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales

22 Las celdas que se muestran resaltadas, serán utilizadas para la Campaña Experimental.

Existen dos maneras de mejorar la durabilidad de un compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales:

- Mejorar la Fibra
- Mejorar la Matriz

A continuación se muestra una tabla que resume las múltiples mejoras empleadas por varios autores y sus resultados. Los estudios revisados están limitados a ser amigables con el medio ambiente y de bajo costo, por tanto no se verá estudios en los que se combina las fibras vegetales con fibras sintéticas como PVA, etc.

Tabla 7 _ Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales²².

2.5. Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales

MÉTODOS PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE LOS COMPUESTO CEMENTICIOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES									
CAMPO	TEMA	HIPÓTESIS	TIPO DE FIBRA	PROCEDIMIENTO	RESULTADO	AUTOR	AÑO	BIBLIOGRAFIA	OBSERVACIONES
MEJORAS DE LA FIBRA	1. Haces de Fibras	Colocar las fibras a manera de haces o grupos de fibras. Las fibras externas en contacto con el mortero pueden sufrir los daños propios del envejecimiento. Mientras que las fibras internas cumplirán el papel de soporte de los esfuerzos de tensión	Fibra de Sisal	Se crea una malla formada por 30 fibras y se introduce en la matriz.	No se muestra mejoría en la curva tenso-deformación del Ensayo de Resistencia a Flexión. Sin embargo muestra mayor deformación del compuesto (entre 2 y 6%). Envejecimiento: Las fibras son afectadas por la alcalinidad y el compuesto se debilita.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)	Las fibras exteriores sufren la descomposición al estar en un medio alcalino, por tanto generan vacíos y falta de adherencia fibra-matriz. La fibras internas al no tener contacto con la matriz, se deterioran menos, pero no sirven de refuerzo ya que no tienen adherencia con la matriz.
	2. Impregnación con agentes bloqueadores	Impregnar previamente la fibra con soluciones insolubles en el agua alcalina.	Fibra de Sisal	Se discute acerca de varios compuesto: Silicato de Sodio, Sulfito de Sodio, Sulfato de Magnesio, etc.	Ninguna de las impregnaciones probadas muestra mejoría en la durabilidad de la fibra dentro de la matriz cementicia.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)	
	3. Impregnación con repelentes al agua	Impregnar previamente la fibra con agentes repelentes al agua.	Fibra de Sisal	Se prueba con: resinas epoxi y poliéster sulfuro, productos bituminosos, PVA, aceite de silicón, etc.	Reducen la adherencia entre la fibra y la matriz. No previenen que la fibra se descomponga.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)	
	4. Impregnación agentes bloqueadores y repelentes al agua	Combinación de los dos anteriores.	Fibra de Sisal	Primero impregnar con los agentes bloqueadores y luego con los agentes repelentes de agua.	Se da un debilitamiento de la fibra antes de empezar su envejecimiento. Sin embargo las impregnaciones de Formine y Ácido Estéarico ó Nitrate de Bario y Ácido Estéarico, dan un efecto favorable y retardan el proceso de debilitamiento del compuesto.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)	
	5. Tratamiento previo a las Fibras	Tratamiento con Silicato de Sodio	Fibra de Lino, Cáñamo y Phormium	Se trata la fibra con silicato de sodio para mejor la superficie e incrementar su resistencia.	No se logró el resultado deseado.	Hernández y Odone	1988	(Agopyan 1988)	
	6. Tratamiento previo a las Fibras	Tratamiento con Bencina Blanca, Hidróxido de Sodio ó cualquier líquido de limpieza de casa ordinario.	Fibra de Lino, Cáñamo y Phormium	Se trata la fibra con estos compuestos, con el objetivo de limpiarla y mejorar la superficie.	La resistencia del compuesto final aumenta hasta en un 25%.	Hernández y Odone	1988	(Agopyan 1988)	El mejor resultado se da al usar hidróxido de sodio.
	7. Tratamiento previo a la fibra de bajo impacto a la estructura de la fibra y bajo costo.	Lavar la fibra con Jabón Ordinario	Fibra de Malva	Se utiliza jabón ordinario para remover polvo y residuos.	Vuelve más áspera la superficie de la fibra, mejora la adherencia fibra-matriz y vuelve más resistente la fibra en un medio alcalino.	Olivera, M.J.E. Agopyan, V.	1992	(Olivera & Agopyan 1992)	
	8. Tratamiento previo a la fibra de bajo impacto a la estructura de la fibra y bajo costo.	Impregnar la fibra con Aceite de Linaza, a manera de protección superficial.	Fibra de Malva	Se impregna con aceite de linaza a una temperatura de 20° - 21°C. Se retira con papel absorbente el exceso de aceite de las fibras.	No se tiene buena adherencia entre la fibra y la matriz debido al aceite.	Olivera, M.J.E. Agopyan, V.	1992	(Olivera & Agopyan 1992)	
	9. Cornificación de la Fibra	Evitar que la fibra absorba el Hidróxido de Calcio, de una manera económica y amigable ambientalmente. Se realiza ciclos de lavado y secado de las fibras.	Pulpa de maderas suaves y linteres de algodón.	Se somete a las fibras a ciclos de secado y re-humedecido.	Las fibras muestran mejor estabilidad dimensional, mejora en la adherencia fibra-matriz, reducción del porcentaje de retención de agua con lo que se reduce las incrustaciones de hidróxido de calcio en la superficie y el lumen.	Claramunt, Josep Ardanuy, Mónica García-Hortal, José Antonio Filho, Romildo Dias Tolédo	2011	(Claramunt et al. 2011)	

2.5. Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales

MÉTODOS PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE LOS COMPUESTO CEMENTICIOS REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES										
CAMPO	TEMA	HIPÓTESIS	TIPO DE FIBRA	PROCEDIMIENTO	RESULTADO	AUTOR	AÑO	BIBLIOGRAFIA	OBSERVACIONES	
MEJORAS DE LA MATRIZ	1. Sellado de Poros	Aumento de la proporcionalidad de finos o incremento del contenido de cemento	Fibra de Sisal	Se obtiene una mezcla más densa, donde el tamaño de poro será menor, por tanto el transporte de agua será menor también.	Son efectivos, pero no al 100%.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	2. Sellado de Poros	Reducción de la relación A/C	Fibra de Sisal	Se obtiene una mezcla más densa, donde el tamaño de poro será menor, por tanto el transporte de agua será menor también.	Son efectivos, pero no al 100%.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	3. Sellado de Poros	Incorporación de palímeros, siliconas o esterátos	Fibra de Sisal	Se obtiene una mezcla más densa, donde el tamaño de poro será menor, por tanto el transporte de agua será menor también.	Son efectivos, pero no al 100%.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	4. Sellado de Poros	Impregnación post-fabricación	Fibra de Sisal	Impregnación con sulfuro, asfalto, aceite, etc. Para evitar el ingreso de agua	Son efectivos, pero no al 100%.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	5. Sellado de Poros	Agregar bolas de cera al mortero	Fibra de Sisal	Se agrega pequeñas bolitas de cera al mortero fresco, cuando empieza a endurecer y aumenta la temperatura, la cera se derrite y sella los poros. Se utiliza un 6,5% del peso del aglomerante para la bolas de cera.	Brinda un efecto positivo en el compuesto. Al cabo de 120 ciclos de envejecimiento acelerado, no disminuye la resistencia del compuesto.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	6. Reducción de la Alcalinidad - Carbonatación	Reducir el pH de la matriz para evitar el deterioro de la fibra. Mediante la carbonatación de las muestras. El pH de un hormigón ordinario excede los 13, mientras que la fibra se conserva en buen estado en un pH inferior a 9	Fibra de Sisal	Carbonatación de toda la probeta. Se mete las probetas a una cámara al vacío. Después de extraer todo el aire, se introduce dióxido de carbono, dejando las probetas por varios días.	La probeta no logró carbonatarse por completo. Varios factores influyeron.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	7. Reducción de la Alcalinidad - Carbonatación	Colocar las fibras de refuerzo en las caras exteriores del panel (beneficioso estructuralmente). Estas se carbonatarán y quedarán protegidas.	Fibra de Sisal		Solo quedó a manera de propuesta. No se llegó a realizar.			(Gram 1988a)		
	8. Reducción de la Alcalinidad	Remplazar parte del Cemento Portland Ordinario por materiales puzolánicos, como escorias de altos hornos o cenizas volantes.	Fibra de Sisal	Se utiliza escorias de altos hornos y cenizas volantes.	Se reduce la alcalinidad pero no de la manera deseada.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)		
	9. Reducción de la Alcalinidad	Remplazar parte del Cemento Portland Ordinario por materiales puzolánicos, como humo de sílice	Fibra de Sisal	Se utiliza humo de sílice. Características: su molienda es sumamente fina.	Aumenta la durabilidad de la fibra en el interior del compuesto, especialmente cuando se reemplaza entre un 30 a 50% en proporción del peso del aglomerante. Se obtiene una reducción del pH en 0,30 y 1,20 reemplazando cantidades del 17% y 33% respectivamente.	Gram, Hans-Erik	1988	(Gram 1988a)	No se recomienda en países en vías de desarrollo por el costo elevado del humo de sílice. Sin embargo allí se dispone de sustancias que pueden cumplir el mismo objetivo como las cenizas de cáscara de arroz, la diatomita, etc.	
	10. Reducción de la Alcalinidad	Remplazar entre el 40% al 50% del cemento portland con un ultra-fino humo de sílice reactivo.				Rehis, S.S.	1988	(Rehsi 1988)	Son sugerencias a manera de conclusión, no se realizó pruebas.	
	11. Reducción de la Alcalinidad	Usar Cemento portland de escoria en lugar de cemento portland ordinario.		Fibras de Coco			Rehis, S.S.	1988	(Rehsi 1988)	Son sugerencias a manera de conclusión, no se realizó pruebas.
	12. Reducción de la Alcalinidad	Remplazo del Cemento Portland Ordinario por puzolanas altamente reactivas.			Remplazo del 30% del aglomerante por cenizas de cáscara de arroz.		John, V.M. Agopyan, V. Derolle, A. Chatveera, B. Nimityongskul, P.	1990	(John et al. 1990)	Incrementa la durabilidad de las fibras vegetales, únicamente cambiando la composición de la matriz.
	13. Reducción de la Alcalinidad	Remplazo del Cemento Portland Ordinario. En combinaciones binarias con: Escoria, Humo de Sílice, Clase C de cenizas, Clase F de cenizas volantes, Metacaolín, Diatomea tierra/volcánica	Pulpa Kraft	Se ensaya varias combinaciones binarias, siendo las más efectivas: 30% de humo de Sílice, 50% de Humo de Sílice, 90% de Escoria ó 30% de Metacaolín.	Luego de los 25 ciclos seco-húmedo, los ensayos mecánicos mostraron que las combinaciones binarias son las más efectivas: 30% de humo de Sílice, 50% de Humo de Sílice, 90% de Escoria ó 30% de Metacaolín.	Mohr, B.J. Biernacki, J.J. Kurtis, K.E.	2007	(Mohr et al. 2007)		
	14. Reducción de la Alcalinidad	Remplazo del Cemento Portland Ordinario. En combinaciones ternarias y cuaternarias con: Escoria, Humo de Sílice, Clase C de cenizas, Clase F de cenizas volantes, Metacaolín, Diatomea tierra/volcánica	Pulpa Kraft	Se varias combinaciones ternarias y cuaternarias con los siguientes materiales: Escoria, Humo de Sílice, Clase C de cenizas, Clase F de cenizas volantes, Metacaolín, Diatomea tierra/volcánica	Los ensayos mecánicos mostraron que tanto las combinaciones ternarias como las cuaternarias, son efectivas en minimizar o prevenir la degradación del compuesto, pero no de una manera tan efectiva como las binarias, luego de 25 ciclos seco-húmedo.	Mohr, B.J. Biernacki, J.J. Kurtis, K.E.	2007	(Mohr et al. 2007)		

2.5. Métodos para mejorar la durabilidad del compuesto cementíceo reforzado con fibras vegetales

Sin embargo la manera más efectiva de mejorar el comportamiento del compuesto es trabajando sobre los dos campos: fibra y matriz.

Con un trabajo conjunto en las dos áreas lograremos mejorar la durabilidad del compuesto en sí. Un ejemplo de ello, es el estudio realizado por Gram [35], quien reduce la alcalinidad de la matriz usando humo de sílice e impregna la fibra con agentes bloqueadores al ataque alcalino y repelentes del agua (Formine y Ácido Estereático; Bario y Ácido Estereático). Al cabo de 4 años los compuestos mantienen buena parte de su resistencia.

3. Estado del Arte Industrial: Compuestos Cementíceos Reforzados con Fibras Vegetales (VFRCC)

- 3.1. Paneles de fibrocemento en el mercado actual de España
 - 3.2. Normativa actual para la fabricación
 - 3.3. Manipulación del Fibrocemento: Normativa actual
-

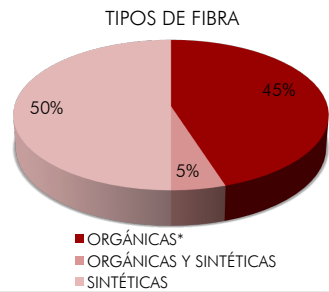
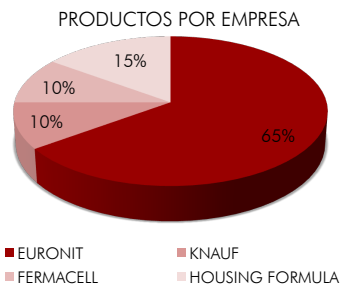
El fibrocemento es un material que tiene más de 100 años en el mercado, y ha establecido un hito como material de construcción. Hoy en día sus aplicaciones son muy variadas, así como los métodos de fabricación y sus componentes.

Para tener una visión global del material en la actualidad, se realiza una investigación de los paneles existentes en el mercado actual español, la normativa vigente, tanto para su aceptación como para la manipulación del material.



Imagen 35 _ Manual Técnico de Hydropanel. Euronit. [45]

3.1. Paneles de fibrocemento en el mercado actual de España



Gráfica 1 _ Productos por Empresa. (Fuente Propia)

Gráfica 2 _ Tipos de Fibra Empleadas. (Fuente Propia)

Para realizar una investigación acerca que los paneles existentes en el mercado actual, es preciso establecer ciertos límites en la búsqueda, que permitan concretar los resultados. Estos límites son:

- Paneles para fachada o tabiques interiores disponibles en España.
- Material Fibrocemento. Se ha descartado los paneles aglomerados de fibras y cemento, pues no son el objetivo de estudio de este trabajo de investigación.

La búsqueda se realizó en páginas de internet y consultando la Base de Datos del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Este último dispone en su página web un buscador que permite encontrar los Documentos de Idoneidad Técnica (DIT), otorgados a [46]:

“Pueden ser objeto de DIT aquellos materiales, sistemas o procedimientos constructivos para los que no se han desarrollado NORMAS que regulen tanto las características o prestaciones del producto como su empleo o puesta en obra, y que además satisfagan las siguientes condiciones:

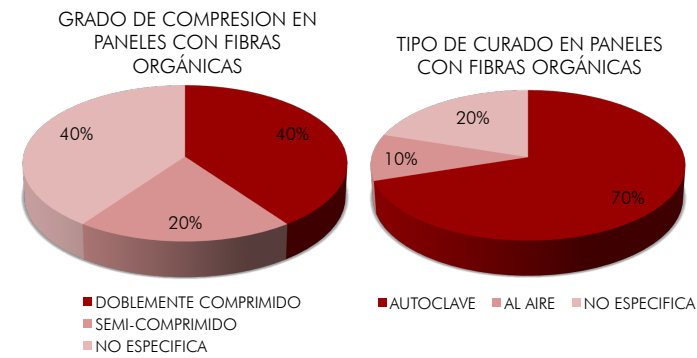
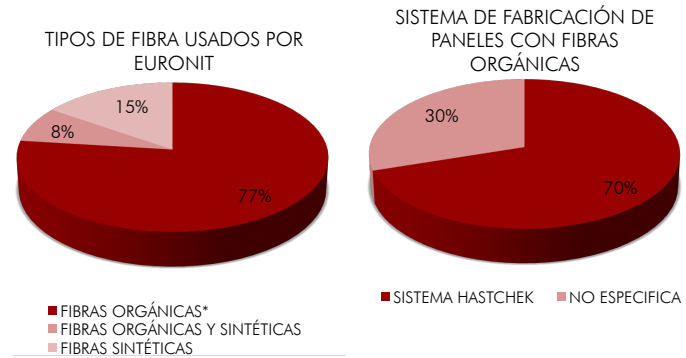
- *Materiales y equipos fabricados industrialmente o procedimientos que hayan sido empleados en aplicaciones reales.*
- *Materiales o sistemas perfectamente identificables.*
- *Materiales o sistemas que estén previstos para un empleo determinado e inequívoco.”*

En el Anexo 9.1, se puede encontrar la Tabla que contiene los productos encontrados, con un total de 20 placas de fibrocementos y de los cuales podemos observar lo siguiente:

- Existen cuatro empresas en el mercado: Euronit, Knauf, Fermacell y Housing Formula. De las cuales, la primera domina el mercado con 13 productos.
- El 45% de los paneles utilizan son fibras orgánicas. Si bien en algunas se especifica que son fibras de celulosa, en la mayoría de productos no se dice el tipo exacto de fibra. Y, en todos los paneles con este tipo de fibras, se utiliza rellenos minerales.
- El 5% realizan mezclas de fibras orgánicas y fibras sintéticas. Mientras que el 50% son sintéticas: fibras de PVA, fibra de vidrio resistente al álcalis, etc.

3.1. Paneles de fibrocemento en el mercado actual de España

- Knauf, Fermacell y Housing Formula, utilizan fibra de vidrio en sus productos. Las dos primeras, usan mallas en las caras externas del panel, por tanto su conformación es tipo sándwich. Los paneles de estas dos empresas, no tienen un acabado final, es decir, necesitan pintura, un revoco o alicatado. Por otro lado, Housing Formula posee paneles mas complejos, algunos tienen una sub-estructura posterior o son para usos exclusivos. Se solicitan bajo pedido y ofrecen múltiples texturas, colores, incluso moldes en 3D.
- Euronit es la única empresa que utiliza fibras orgánicas en la mayoría de sus productos (diez de sus trece paneles).
- Todos los paneles con fibras orgánicas llevan un tratamiento de impermeabilización en sus caras exteriores, ya sea por dispersión acrílica, hidrofugación con silanos, entre otros.
- De los paneles que usan fibras orgánicas (10 en total): 7/10 son elaborados con el sistema Hastchek; 8/10 tienen algún grado de compresión: semi-comprimido, comprimido, doblemente comprimido; 7/10 utilizan el sistema de curado por autoclave.



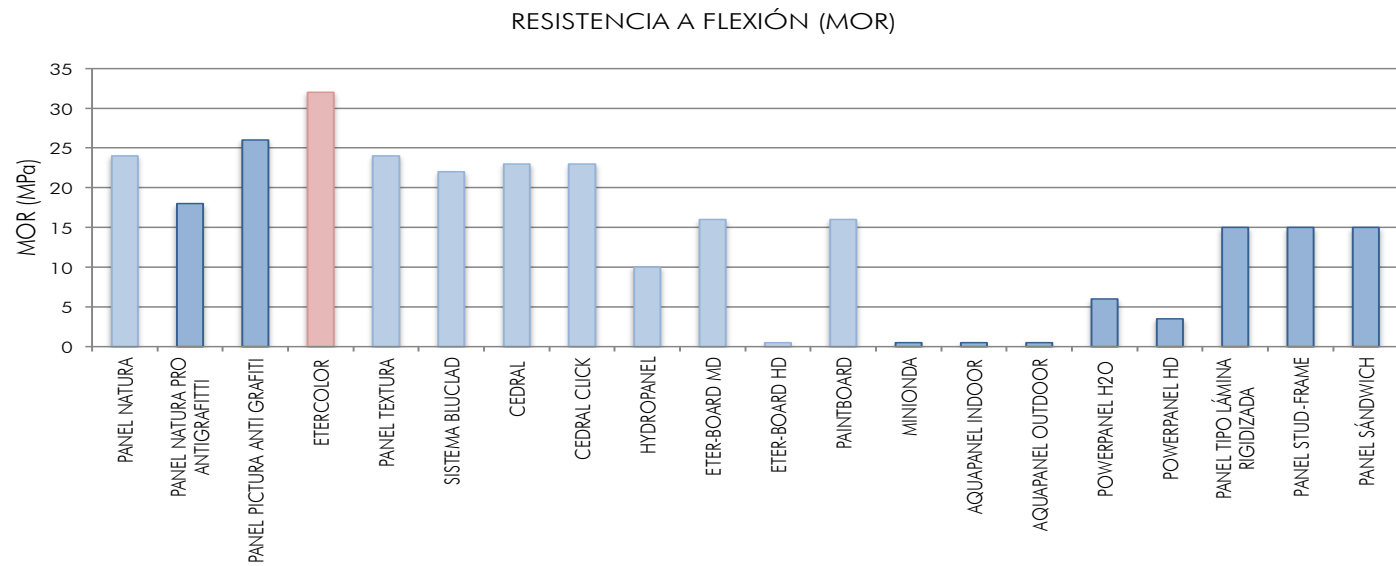
Gráfica 3 _ Tipos de Fibra usados por Euronit. (Fuente Propia)

Gráfica 4 _ Sistemas de Fabricación de Paneles con Fibras Vegetales. (Fuente Propia)

Gráfica 5 _ Grado de Compresión en Paneles con Fibras Vegetales. (Fuente Propia)

Gráfica 6 _ Tipo de Curado en Paneles con Fibras Vegetales. (Fuente Propia)

3.1. Paneles de fibrocemento en el mercado actual de España



Gráfica 7 _ Módulo de Rotura (MOR) de Paneles Comerciales.

(Fuente Propia)

Azul Oscuro: Fibras Sintéticas

Azul Claro: Fibras Orgánicas con Rellenos Minerales

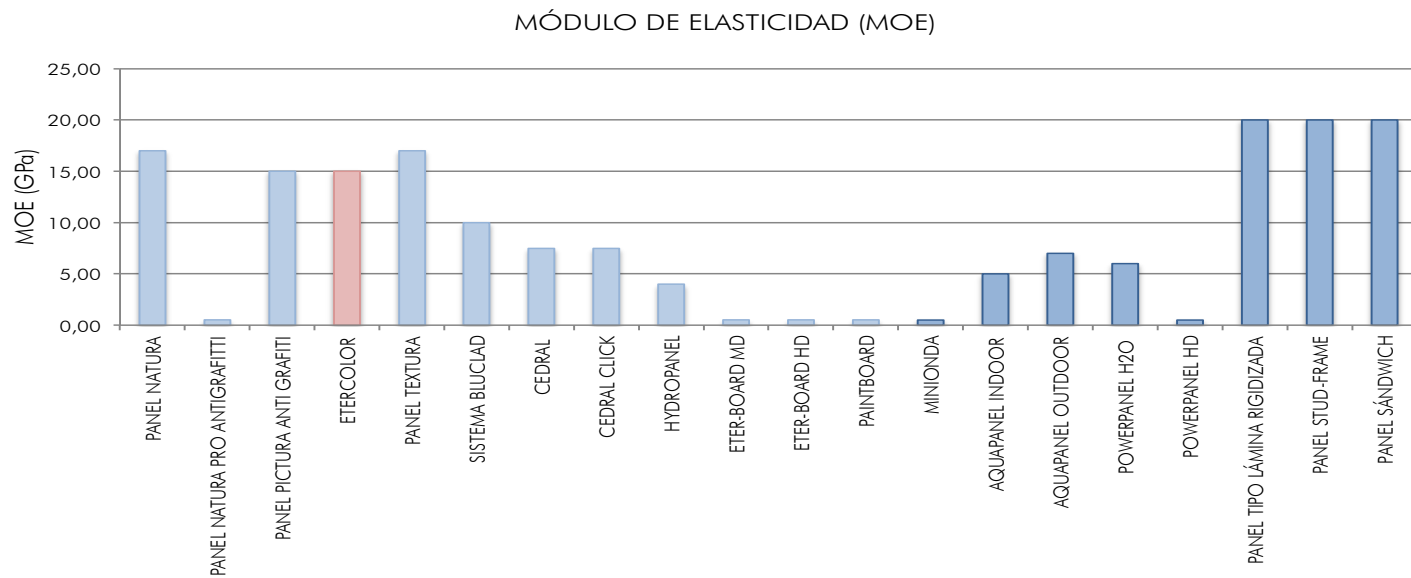
Rosa: Panel de Referencia para compararlo en la Campaña Experimental.

A manera de conclusión, la empresa con más historia en el fibrocemento es Euronit como se observa en la cantidad de productos que posee. Además es la única que trata de innovar con el uso de las fibras orgánicas, sin que ello implique una baja resistencia o durabilidad. Al contrario, poseen resistencias

iguales o superiores a los productos con fibras sintéticas.

Aunque los paneles con fibras vegetales utilicen rellenos minerales y protecciones extras contra la intemperie, a nivel medio ambiental, son mucho más sustentables y con menor

3.1. Paneles de fibrocemento en el mercado actual de España



Gráfica 8 _ Módulo de Elasticidad (MOE) de Paneles Comerciales. (Fuente Propia)

Azul Oscuro: Fibras Sintéticas
 Azul Claro: Fibras Orgánicas con Rellenos Minerales
 Rosa: Panel de Referencia para compararlo en la Campaña Experimental.

cantidad de emisiones de CO2 en su fabricación.

Ha sido seleccionado el producto ETER COLOR de Euronit, para realizar una comparación con el panel de la Campaña Experimental, debido a la similitud de sus características con lo

planteado más adelante, tales como sus materiales básicos, su forma de fabricación y en especial, por ser uno de los pocos que no requiere recubrimiento luego de ser colocado en fachada.

3.2. Normativa actual para fabricación

3.2.1. Hormigones

23 En el caso específico de hormigones reforzados con fibras se hace referencia a la Norma UNE 83500-1:1989, UNE 83500-2:1989, UNE 83503:2004, UNE 83510:2004, UNE 83512-1:2005 y UNE 83512-2:2005

La Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, referida a la normativa UNE, UNE-EN o UNE-EN-ISO²³, tiene por objetivo principal ser el marco reglamentario, donde se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón para garantizar su uso.

Dentro de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 se encuentra el Anejo 14 en el cual hace referencia a las "Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras", se regulariza el uso de fibras estructurales y no estructurales, así como su uso dentro de hormigones estructurales y no-estructurales. Las fibras consideradas dentro de la normativa son:

- Fibras de Acero
- Fibras Poliméricas (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol polivinilo, acrílico, nylon, poliéster)
- Otras fibras inorgánicas (fibra de vidrio resistente al álcalis)

Quedando "expresamente fuera de los objetivos de este Anejo: los hormigones fabricados con fibras distintas a las que constan en este Anejo como aceptables para su uso en hormigones" [19].

Portanto, las fibras vegetales no están amparadas como refuerzos de hormigones, ya sean estructurales o no-estructurales.

3.2. Normativa actual para fabricación

3.2.2. Fibrocementos

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR)²⁴, posee una norma específica para compuestos en base de cemento reforzados con fibras[8]:

NORMATIVA:	UNE-EN 12467:2013
TÍTULO:	Placas planas de cemento reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo.
ESTADO:	Vigente
FECHA DE CONSULTA:	11/07/2014
OBJETO:	Especificar los requisitos técnicos y establecer los métodos de inspección y ensayo, así como las condiciones de aceptación de las placas planas de cemento reforzado con fibras, placas de paramentos y tableros.
CAMPO DE APLICACIÓN:	- Revestimientos interiores de paredes y techos; - Revestimientos exteriores de paredes y techos.
COMITÉ:	AEN/CTN 88 – Productos de Cemento Reforzado con Fibras
SECRETARÍA:	LOEMCO

Esta normativa establece unos requisitos que los paneles deben cumplir para su admisión en el mercado:

- Composición: las placas deben estar constituidas esencialmente por cemento o por un silicato de calcio formado por la reacción química de un material silíceo con otro calcáreo, reforzado con fibras. El cemento debe cumplir la Norma Europea EN 197-1 o las especificaciones técnicas en vigor correspondientes al país de utilización. Las fibras de refuerzo deben tener una o varias de las formas siguientes:

- o Elementos discretos dispersos al azar.
- o Tiras o cintas continuas.
- o Redes o tejidos.

Se puede añadir aditivos, filler, áridos y pigmentos.

²⁴ Encarga de “mejorar la calidad y competitividad de las empresas, sus productos y servicios”

Tabla 8.- Basada en información de la Norma UNE-EN 12467:2013. [8]

3.2. Normativa actual para fabricación

NÚMERO DE MUESTRAS Y CRITERIOS DE CONFORMIDAD				
CARACTERÍSTICAS	REQUISITO	MÉTODOS DE EVALUACIÓN	NÚMERO DE MUESTRAS	CRITERIOS DE CONFORMIDAD
Resistencia mecánica	5.4.4	7.3.2	Al menos 10 muestras	Tabla 6 del apartado 5.4.3; se aplica un NCA del 4%
Densidad	5.4.2	7.3.1	Inspección por variable, método d o s	5.4.2
Reacción al fuego	5.6.1	7.5.2	7.5.2	7.5
Impermeabilidad al agua	5.4.5	7.3.3	3 placas de ensayo	5.4.5
Permeabilidad al vapor de agua	5.4.6	7.3.4	3 placas de ensayo	5.4.6
Variaciones dimensionales	5.3	7.2	Al menos 10 muestras	5.3.4 y 5.3.5
Emisión de sustancias peligrosas	5.6.2	5.6.2		5.6.2
Agua caliente	5.5.4	7.3.5	10 muestras	5.5.4 y 7.3.5.4
Inmersión - Secado	5.5.5	7.3.6	10 muestras	5.5.5 y 7.3.6.4
Hielo - deshielo	5.5.2	7.4.1	10 muestras	5.5.2 y 7.4.1.4
Calor - lluvia	5.5.3	7.4.2	7.4.2.4	5.5.3 y 7.4.2.5

- Clasificación:
 - o Según su resistencia a la intemperie: Categoría A, B, C ó D.
 - o Según su resistencia al momento flector: Clase 1, 2, 3, 4 ó 5.
 - o Según su dimensión y método de instalación: Placas de pequeño tamaño y Placas de gran tamaño.
 - o Según las tolerancias dimensionales.
- Los ensayos para cada clasificación son: (Tanto los requisitos, métodos de evaluación y criterios de conformidad son referentes a la Norma UNE EN 12467:2013, que se encuentra en el Anexo 9.2: Normas y Métodos de Ensayo)

Esta normativa será citada nuevamente en la Campaña Experimental.

Tabla 9 _ Número de muestras y criterios de conformidad. [8]

3.3. Manipulación del fibrocemento: Normativa actual

En muchas de las fichas técnicas de los paneles comerciales citados anteriormente, se indican los parámetros que se requieren para trabajar con estos materiales.

Principalmente se hace hincapié en el uso de maquinaria similar a la que se usa en madera. Sin embargo, no se comenta mucho acerca de las precauciones que se deben tener con el exceso de polvo y la existencia de una Norma por parte de AENOR para la manipulación del fibrocemento tanto en placas planas como onduladas.

La Norma UNE 88412 de AENOR [47], “Productos de fibrocemento NT (sin amianto): Directrices para su corte y mecanizado en obra”, hace referencia a la herramienta empleada para el corte y mecanizado de los fibrocementos NT, tanto en placas onduladas, nervadas, planas y productos modelados, etc.

Una de las principales recomendaciones que hace esta normativa, es el empleo de herramientas que eviten o reduzcan la producción de polvo durante el montaje. Siendo las más recomendables aquellas de uso manual o eléctricas de baja velocidad. Caso contrario, pide humedecer la zona a cortar,

dotar al operario de mascarilla y proporcionar el espacio con herramientas de aspiración.

Las herramientas recomendadas según la labor a realizar para placas planas, se especifica en la Tabla 10 (placas planas) y Tabla 11 (placas onduladas).

Corte	Taladrado	Pulido	Sacabocados
Sierra manual Sierra percutora Sierra de cinta manual Garra (cúter) Sierra fresadora de velocidad lenta	Taladradora manual o de motor	Pulidoras de motor con aspiración de polvo	Sierra manual Sierra percutora Sierra fresadora de velocidad lenta
<p>NOTA 1 - Para las placas prensadas y las silicoalcalíneas tratadas en autoclave, se recomienda utilizar sierras circulares o percutoras de motor con disco de diamante y un equipo eficaz de aspiración de polvo.</p> <p>NOTA 2 - En caso de utilización continua de taladradoras de motor, es necesario disponer de aspiración de polvo.</p> <p>NOTA 3 - Después del corte, debe evitarse la operación de acabado por raspado o el empleo de papel abrasivo.</p>			

Corte de esquinas	Corte transversal	Corte longitudinal	Sacabocados	Taladrado
Sierra manual Sierra percutora Sierra de cinta manual Garra (cúter) Sierra fresadora de velocidad lenta	Sierra manual Sierra percutora Sierra fresadora de velocidad lenta	Sierra manual Sierra percutora Sierra fresadora de velocidad lenta	Sierra manual Sierra percutora Sierra fresadora de velocidad lenta	Taladradora manual Taladradora de motor
<p>NOTA 1 - Para las placas prensadas y las silicoalcalíneas tratadas en autoclave, se recomienda utilizar sierras circulares o percutoras de motor con disco de diamante y un equipo eficaz de aspiración de polvo.</p> <p>NOTA 2 - En caso de utilización continua de taladradoras de motor, es necesario disponer de aspiración de polvo.</p>				

Tabla 10 _ Herramental recomendado según las operaciones a efectuar. Placas Planas. [47]

Tabla 11 _ Herramental recomendado según las operaciones a efectuar. Placas Planas. [47]

4. Materiales y Métodos

- 4.1. Ensayos de resistencias mecánicas
 - 4.2. Definición de la Campaña Experimental
 - 4.3. Selección de ensayos de caracterización de la Campaña Experimental
-

4.1. Ensayos de resistencias mecánicas

4.1.1. Ensayo de compresión

Las fibras aumentan la porosidad del material, por tanto la resistencia a la compresión decrece conforme el volumen de fibra aumenta. Además, el incremento de la relación A/C para obtener una mezcla trabajable, contribuye con esta reducción.

Sin embargo, en los ensayos a compresión realizados por Claramunt y col. [31] (compuestos reforzados con pasta kraft y linteres de algodón), se observa que cerca del punto de rotura, las probetas tienden a romperse con una forma bi-piramidal y las fibras muestran un efecto de "unión" que aumenta la ductilidad del producto final.

4.1.2. Ensayo de flexión

La curva de tenso-deformación depende de varios factores como: la resistencia de la matriz, módulo de elasticidad de la fibra y la matriz, la resistencia a la tensión de la fibra, la unión fibra-matriz, el largo de la fibra y su diámetro, y finalmente la orientación de la fibra [35].

Un compuesto cementíceo reforzado por fibras vegetales presenta una curva como la que vemos en la Imagen 36. La "primera grieta" denominada "límite de proporcionalidad", marca un punto importante en la curva: su primera parte (izquierda), corresponde al trabajo mayormente de la matriz; y el resto de la curva (derecha) corresponde al trabajo principalmente de la fibra [31].

A partir del primer agrietamiento de la matriz, se puede observar el verdadero trabajo de las fibras. El compuesto se deforma sin desprender sus partes, comportándose como un material dúctil [48]. Incluso cuando el ensayo culmina, la probeta queda totalmente deformada en una sola pieza, sin dividirse en dos o más partes como ocurre generalmente con los compuesto no-reforzados.

Si quisiésemos comparar un VFRCC vs uno no-reforzado,

4.1. Ensayos de resistencias mecánicas

70

25 La relación A/C es un tanto incontrolable. Es difícil saber cuanta agua hidrata la matriz y cuanta es absorbida por las fibras. Incluso puede darse el caso de dos VFRCC iguales lleguen a tener una distinta relación A/C, debido al comportamiento anisotrópico de las fibras.

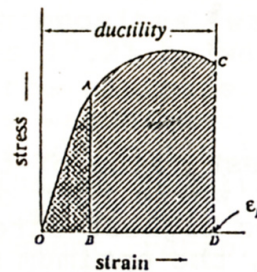
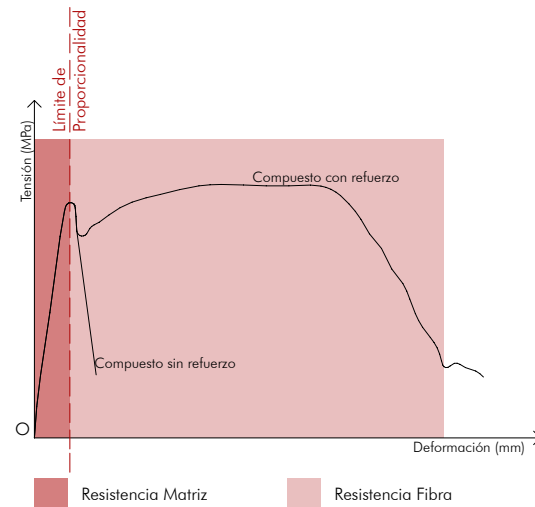


Imagen 36 _ Ejemplo de la curva de Carga-Deformación.
(Fuente Propia)

no habría como. Pues el compuesto no-reforzado tiene una densidad diferente, porosidad diferente y una distinta relación agua cemento²⁵, por lo que una comparación en estas condiciones no sería equitativa. Si se desea tener un valor únicamente de la matriz, se consideraría el valor de la primera grieta como tal [31].

Resiliencia, Tenacidad, Energía

En la Imagen 37 podemos ver la curva típica del ensayo a flexión de un material, la cual nos indica sus dos fases: Resiliencia y Tenacidad (ambas expresadas en J/m^2 ó kJ/m^2).

- Resiliencia: este módulo se determina por el área bajo la curva de carga-deformación, comprendida entre OAB [43]. Se trata de la fase elástica del material, es decir el período donde el compuesto recupera su forma sin sufrir una deformación cuando se retira la carga que se ejerce sobre él.
- Tenacidad: este módulo viene expresado por el área bajo la curva de carga-deformación, OACD [43]. Es la fase plástica del material, con la cual podemos ver la cantidad de Energía (J) que el material puede absorber

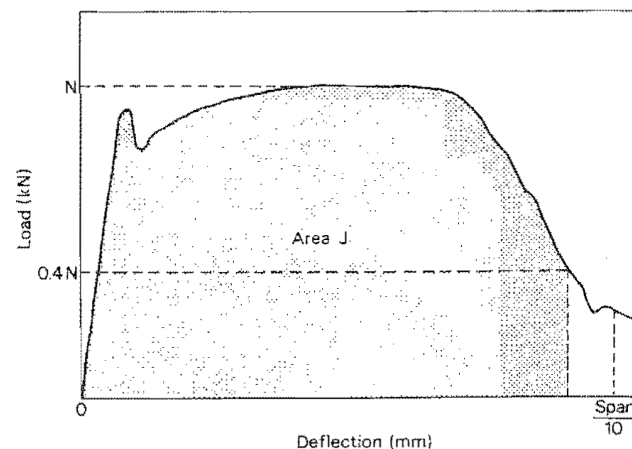
4.1. Ensayos de resistencias mecánicas

antes de su rotura [49]. Cuanto mayor sea la tenacidad de un material, mayor será su ductilidad.

La línea AB se encuentra trazada por el límite de proporcionalidad.

En la fase post-agrietamiento de un fibrocemento se observa una serie de agrietamientos de la matriz (sin que estas piezas lleguen a desprenderse). Las grietas son mucho más delgadas que la grieta de rotura y cuanto más sean, habrá mayor adherencia fibra-matriz. La deformación del compuesto es algo deseable en el material, pues significa que al momento de fallar alertará del episodio.

Los fibrocementos son materiales que pueden llegar a deformar mucho sin romper, por lo que la RILEM²⁶ marca unos límites (según la Imagen 38): el primero, cuando la carga decrece un 40% de la carga máxima aplicada, ó cuando la deformación supera el 10% de la luz entre los apoyos del ensayo a flexión.



26 The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures

Tabla 10 _ Herramental recomendado según las operaciones a efectuar. Placas Planas. [47]

Tabla 11 _ Herramental recomendado según las operaciones a efectuar. Placas Planas. [47]

4.2. Definición de la Campaña Experimental

Como se menciona en los objetivos generales, esta campaña experimental busca elaborar paneles a base de un VFRCC para tener un primer acercamiento a los materiales, métodos de fabricación, normas, ensayos, etc.

El producto está pensado en la envolvente del edificio, cuya aplicación puede ser un sistema de fachada ventilada o similar. Se pretende un material con características similares a las vistas en los paneles comerciales, tales como menor peso que un panel de mortero convencional, buena durabilidad, apto para exteriores, buen acabado superficial, posibilidad de variación en cuanto a color, estabilidad dimensional, impermeabilidad al agua, etc.

Por otro lado, desde un punto de vista académico, se busca mejorar la durabilidad de un VFRCC mediante la reducción de la alcalinidad de la matriz, gracias al remplazo de una parte del cemento portland por un material puzolánico como el meta-caolín. En cuanto al refuerzo, se realiza un tratamiento de "lavado y cornificación" de las fibras vegetales (previo a la elaboración del panel), para aumentar la adherencia fibra-matriz y mejorar su estabilidad dimensional.

Como vimos anteriormente, una mayor cantidad de fibra, aumenta la ductilidad y reduce la densidad, con este objetivo se recurre a un textil no-tejido que permita trabajar con fibras largas sin que estas se enreden o formen grumos.

También se pretende proteger las fibras de refuerzo con una capa de mortero exterior por ambas caras, obteniendo un panel tipo sándwich.

A continuación se define la Campaña Experimental, especificando los materiales y métodos de ensayos. Cabe mencionar que todos los equipos empleados en la fabricación y pruebas se encuentran especificados en el Anexo 9.4 Equipos.

4.2. Definición de la Campaña Experimental

4.2.1. Estructura del panel

De acuerdo al molde utilizado, el panel mide 300 x 300 mm. y está elaborado bajo con una adaptación del sistema Hastchek, utilizada por Savastano Jr. en varios de sus estudios. La fabricación del panel y dicho sistema se explican más adelante.

Se desea un panel de 10mm espesor aproximado (similar a los paneles comerciales), con una estructura tipo sándwich. En sus caras exteriores posee una capa de mortero, denominada "Capa Exterior" y con un espesor de 1 mm aprox.; mientras que en el interior, se trata de una pasta de cemento sin árido (la cual recibe cuatro capas de fibra), llamada "Capa Interior" y con un espesor de 8 mm aprox. En la capa interior se elimina el árido, basando en la investigación de Alethia Sabanés [70] "Uso de no tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción", donde en probetas que no poseen árido obtiene un mayor grado de penetración de la matriz en el no-tejido y homogeneidad.

La capa exterior no sólo protege las fibras, también proporciona al compuesto una capa extra en la que se puede proponer mayor diversidad de acabados.

En la capa interior se colocan cuatro capas de textil no-tejido.

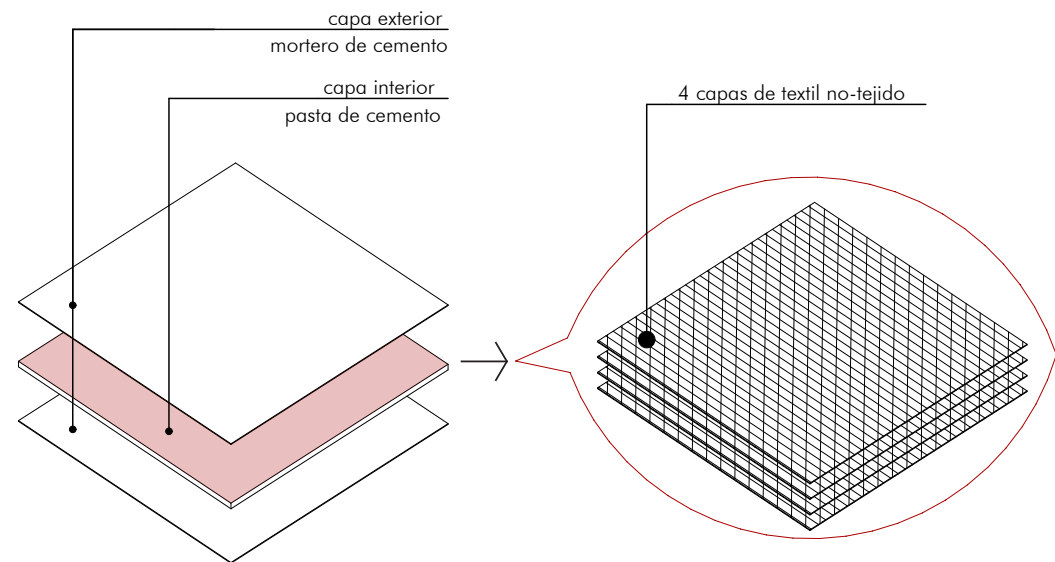
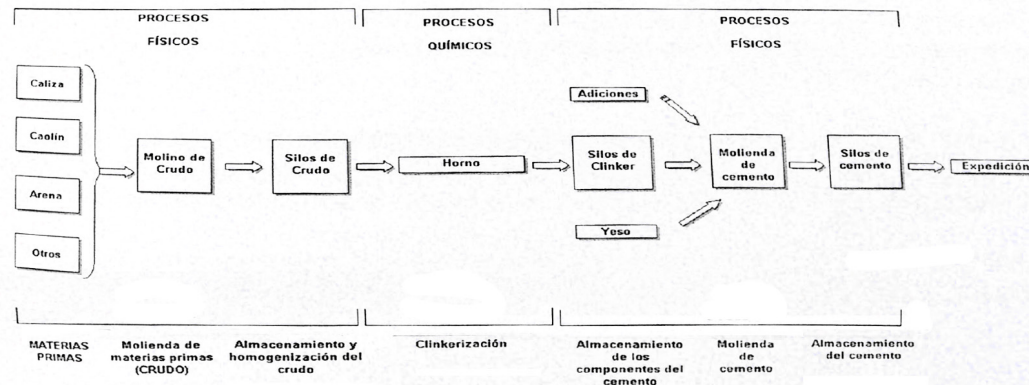


Imagen 39 _ Estructura del Panel. (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CEMENTO BLANCO.



27 White Cement

28 Ordinary Portland Cement

29 Fluoruro de aluminio y sodio

30 Fluoruro de calcio

Imagen 40 _ Esquema del Proceso de Fabricación del Cemento Blanco. [50]

4.2.2.1. Matriz

Cemento Blanco (WC)²⁷

Para cumplir los objetivos a nivel arquitectónico, se utiliza Cemento Blanco Portland BL I. Pues su única diferencia con los cementos portland ordinarios grises (OPC)²⁸, son sus materias primas y los cuidados durante su fabricación [10].

El WC está constituido por una mezcla de Clinker blanco y

yeso (y a veces adiciones). El primero, se obtiene por cocción a 1500° de caliza, arena y arcilla blanca (caolín) [50]. Contiene un máximo de hierro que no sobrepasa el 0,5% en lugar del 3,50% que suele estar presente en los OPC.

Posee características muy parecidas a los OPC en cuanto a: velocidad de hidratación, resistencias mecánicas y estabilidad de volumen. Ambos tienen composiciones químicas similares en cuanto a silicatos, y finalmente, formas de cocción y molienda parecidas[10].

Gracias a la adición de fundentes como la criolita²⁹ o fluorita³⁰, etc., en lugar del hierro, se aumenta el índice de saturación de cal y a la vez la sílice se vuelve más activa combinándose más fácilmente con la cal [10].

Debido a las materias primas del WC y en especial a su molienda, hacen que este material sea más costoso en comparación al OPC. Sin embargo, Dolz, A. [50] en su estudio "Hormigones con cemento blanco" comenta que esto puede verse compensado gracias al color del WC. El material en sí puede ser visto como acabado y no solamente como estructura, además aporta luminosidad y acepta pigmentos.

4.2. Definición de la Campaña Experimental

La autora [50] también menciona que funciona como aislante térmico, ya que atenúa fuertemente la temperatura exterior por su baja inercia térmica (y más aún si tiene fibra vegetal en su interior), refleja la radiación, tiene menor dilatación y menor riesgo de fisuración. El WC presenta mayor resistencia a compresión a los 28 días comparado con el OPC; la resistencia a tracción y Módulo de Elasticidad (MOE) son iguales. Un punto muy importante que se debe tener en cuenta, tanto en la fabricación del WC como en cualquier trabajo que se realice con este material, es evitar su contaminación, ya sea con hierro en su elaboración o con cualquier material durante su ejecución.

Como menciona Manuel Fernández [10], el WC tiende a poseer un uso más arquitectónico que civil, comúnmente es empleado en elementos de fachada, baldosas hidráulicas, terrazas, objetos ornamentales, etc. Gracias a ser un material que facilita el uso de pigmentos: inorgánicos y enérgicos (comúnmente óxidos metálicos), empleados generalmente en porciones del 3 al 10%.

El cemento utilizado en la campaña experimental fue suministrado por la empresa LAFARGE, es de tipo Blanco I 52,5 R [51], su

ficha técnica se encuentra en el Anexo 9.3. Contiene un 95% de Clinker, y está regulado por la Norma UNE 80305:2011.

CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO:

	Valor habitual	Especificaciones según norma	
Clinker (%)	95,3	mín. 95 - máx. 100mín.	(1)
Componente minoritario (%)	4,7	0 - máx. 5	
Pérdida por calcinación (%)	2,8	máx. 5,0	
Sulfato, SO ₃ (%)	1,7	máx. 4,0	
Cloruros, Cl (%)	0,01	máx. 0,10	
Residuo insoluble (%)	0,20	máx. 5,0	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	3940	-	
Expansión Le Chatelier (mm)	0,5	máx. 10,0	(2)
Inicio fraguado (min)	115	mín. 45	
Final fraguado (min)	150	-	
Compresión a 1 día (mpa)	19	-	
Compresión a 2 días (mpa)	35	mín. 23,0	(3)
Compresión a 7 días (mpa)	52	-	
Compresión a 28 días (mpa)	65	mín. 52,5	
Índice de blancura (L*)	93,2	mín. 85,0	(4)

(1) Químicas (2) Físicas (3) Mecánicas (4) Color

Este cemento dispone del certificado de conformidad CE otorgado por AENOR como cemento común (EN 197-1 CEM I 52,5 N) y del certificado de conformidad con los requisitos reglamentarios concedido por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio como cemento blanco (BL I 52,5 N - UNE 80305).

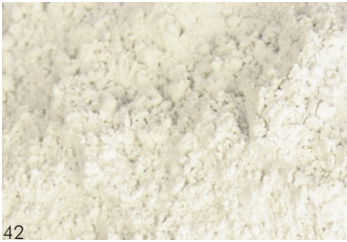
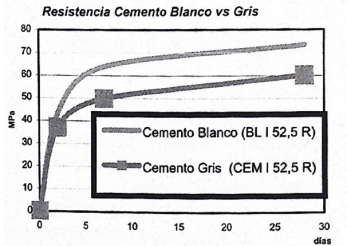


Tabla 12 _ Características del Cemento Blanco

Imagen 41 _ Resistencia a Compresión. WC vs OPC. [50]

Imagen 42 _ Imagen de Cemento Blanco. (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

Meta-caolín (MK)

El meta-caolín es un material puzolánico inorgánico artificial, fruto de la calcinación del caolín (el cual no posee actividad puzolánica previo a la cocción) a temperaturas entre 500 y 800°C (estos datos varían según los distintos autores [52]–[54]). Los materiales puzolánicos por sí solos tienen poco o ningún valor cementante [52].

Posee el 99,9% de partículas $< 16\mu\text{m}$, es decir que su tamaño promedio es alrededor de $3\mu\text{m}$ [53]. Este grado de finura brinda unas características muy buenas a las mezclas que se realicen con ella.

Según Siddique y col. [53] el MK tiene muchos usos con respecto a los compuestos cementíceos:

- Ayuda en el alto rendimiento, alta resistencia y bajo peso.
- Se utiliza para prefabricados de hormigón arquitectónico, civil, industrial y estructural.
- En la fabricación de fibrocementos y ferrocementos.
- Hormigones reforzados con fibra de vidrio.
- Morteros, estucos, materiales de reparación, elementos

de piscinas.

Y sus principales ventajas son:

- Aumento de las resistencia mecánicas: compresión y flexión.
- Reducción de la permeabilidad.
- Mayor resistencia al ataque químico.
- Mayor durabilidad.
- Reducción de la alcalinidad de la mezcla.
- Reducción de la contracción gracias al empaquetamiento de las partículas, obteniendo un hormigón más denso.
- Mejora la manejabilidad y el acabado final.
- Posible reducción de las eflorescencias.
- Mejor capacidad de acabado, color y apariencia.

Además comparado con otros materiales puzolánicos el MK es uno de los más reactivos a nivel puzolánico, como se observa en la Tabla 13.

Cabe recalcar que el MK es un material de color blanco, por tanto no interfiere en el color final del panel o en la utilización de pigmentos.

4.2. Definición de la Campaña Experimental

El material fue suministrado por la empresa Arcilesa Arcillas Refractarias S.A. [55]. Su ficha técnica se encuentra en el Anexo 9.3.

Pozzolan	SF	FA	MK
Reactivity (mg Ca (OH) ₂ /g pozzolan	427	875	1050

Áridos

De igual manera que el MK, el árido seleccionado se busca que sea de color blanco, para no interferir en el acabado final. Para la Campaña Experimental se utiliza una harina de cuarzo de gran pureza. Suministrada por la empresa Sibelco Minerales S.A. Barcelona. La granulometría empleada es muy fina, con un tamaño promedio de partícula de 6,50 μm . Su ficha técnica se encuentra en el Anexo 9.3

Aditivos

Como se mencionó en el Estado del Arte Académico, un VFRCC requiere de un aditivo que ayude con la trabajabilidad de la mezcla fresca junto con las fibras, sin embargo, los paneles que

se caracterizan en la campaña experimental no tienen aditivos. Cuando se realizaron los primeros cuatro paneles no llegaron a tener una consistencia adecuada al finalizar su fabricación. Se estima que esto se produjo por la fina granulometría de los materiales (WC, MK y áridos), junto con el uso del máximo permitido de super-fluidificante. Debido a la falta de tiempo, no se pudo realizar un estudio donde se pudiese probar la cantidad óptima de aditivo necesaria, por tanto, se optó por no usar super-fluidificante, y en compensación aumentar la relación A/C.

Estos paneles a los que se les denomina “fallidos”, se encuentran documentados en el Anexo 9.5.

Agua

El agua utilizada para las mezclas es agua potable.

Desencofrante

Suministrado por la empresa Sika España [60]. El desencofrante usado es Sika Desencofrante LN, cuyo uso principal es para encofrado metálico.

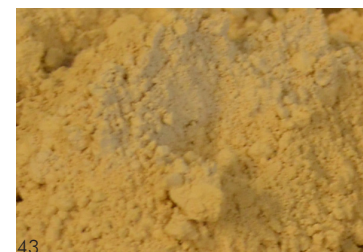


Tabla 13 _ Actividad puzolánica de las puzolanas. [53]

Imagen 43 _ Imagen de Meta-caolín. (Fuente Propia)

Imagen 44 _ Imagen del árido. (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

78



Imagen 45 _ Máquina de fabricación del no-tejido de la ETSEIAT. (Fuente Propia)

Imagen 46 _ Imagen de un textil no-tejido de Lino y Cáñamo. (Fuente Propia)

31 Nonwoven

4.2.2.2. Refuerzo de fibra vegetal

Como se menciona en el punto 2.3.2.3. Longitud y volumen de fibra incorporada, las fibras más adecuadas son aquellas de longitud larga siempre y cuando se tenga cuidado en una buena distribución dentro del compuesto.

Por esta razón se trabaja en la Campaña Experimental con un textil no-tejido (NW)³¹ de fibras largas de Lino y Cáñamo, elaborado por el Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, ETSEIAT, de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Se escoge un NW con el fin de incorporar el mayor volumen de fibra larga, manteniendo un comportamiento isotrópico en el panel.

Un NW es “una estructura laminar o red unidas entre sí por enredo de fibras o filamentos, mediante procesos mecánicos, térmicos o químicos... no son realizadas mediante tejidos o puntos, ni tampoco requieren de la conversión previa de las fibras en lana o hilo”[56].

Las telas NW han sido fabricadas en una línea de punzado de

4.2. Definición de la Campaña Experimental

laboratorio equipada con una carda universal. En el trabajo previo de Claramunt, J. y col. [40], comentan que las telas no-tejidas más adecuadas fueron aquellas que presentaban una “estructuras más abiertas, es decir, con menor grado de punzonamiento y menor gramaje”. Se utiliza 200gr/m2.

Vale aclarar que este tipo de NW no es del todo homogéneo. Previo a la elaboración de los paneles fue necesario, mediante una selección visual, descartar las partes heterogéneas.

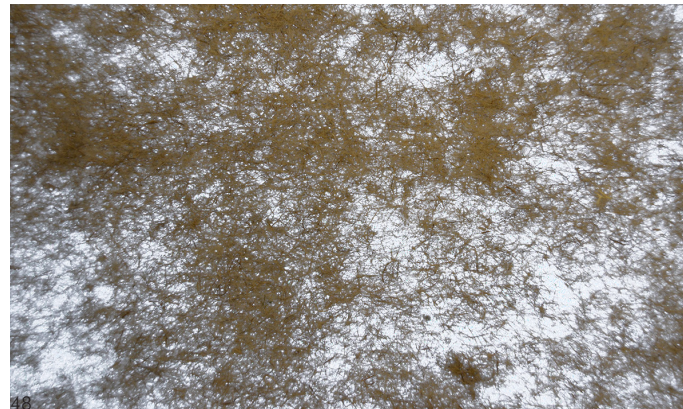


Imagen 47 _ NW Homogénea (Fuente Propia)

Imagen 48 _ NW Heterogénea (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

80

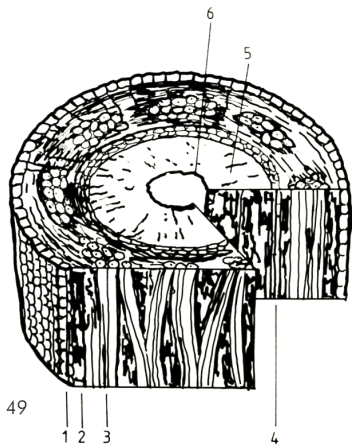
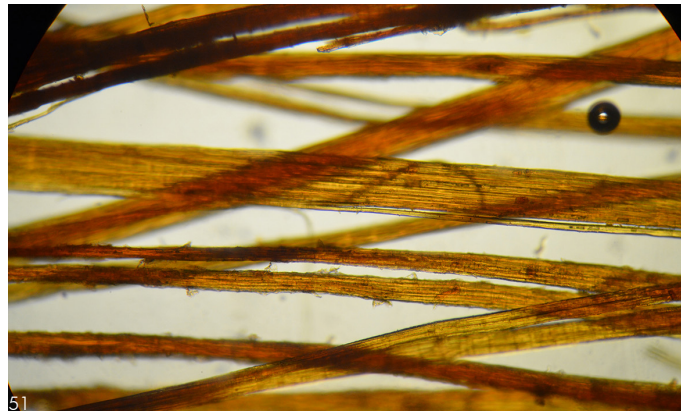


Imagen 49_ Esquema seccional de un patrón de paja de lino. 1.Epidermis 2. Parénquima 3. Haces de fibra de líber 4. Cambium 5. Elemento leñoso 6. Médula. [25]

Imagen 50 _ Fibras de Lino. (Fuente Propia)

Imagen 51 _ Fibra de Lino. Vista por el microscopio. (Fuente Propia)



Fibras del Textil No-tejido

Las fibras usadas en los NW son el Lino y el Cáñamo. Estas son las más comunes procedentes del tallo de la planta, también llamadas Fibras de Líber, son obtenidas de los tejidos vasculares, encargados de transportar las sustancias orgánicas e inorgánicas [57]. Poseen apariencia y dimensiones similares [25].

El Lino³² se obtiene mediante un proceso de enriado³³, donde se rota y recorre a través de unos rodillos similares a un peine. En este proceso se separa las fibras de otras sustancias de la corteza, finalmente se las golpea para eliminar los residuos [25].

Una fibra unitaria de lino tiene forma cilíndrica (Imagen 49). Su sección transversal es redonda poligonal y posee un largo aproximado entre 9 a 70 mm., y un diámetro de 5 a 38 μm .

El Cáñamo³⁴ [25] al igual que el lino, es una planta de crecimiento anual. Sus fibras son obtenidas de la parte interior del tallo. Poseen forma cilíndrica, paredes delgadas y una sección transversal poligonal con aristas redondeadas. Su longitud varía entre 5 – 55 mm., y su diámetro aproximado es

4.2. Definición de la Campaña Experimental

de 10 – 51 μm . En el Anexo 9.5 se puede ampliar información sobre la obtención de este material.

4.2.2.3. Adiciones

Para observar la aplicación de color en los paneles, en uno de ellos se utiliza pigmento en su capa exterior. El pigmento utilizado fue suministrado por la empresa Serra Ciments [59], se trata del pigmento Amarillo 13, el cual se encuentra formulado a base de óxidos de hierro, con alto poder colorante. Su ficha técnica se encuentra en el Anexo 9.3.



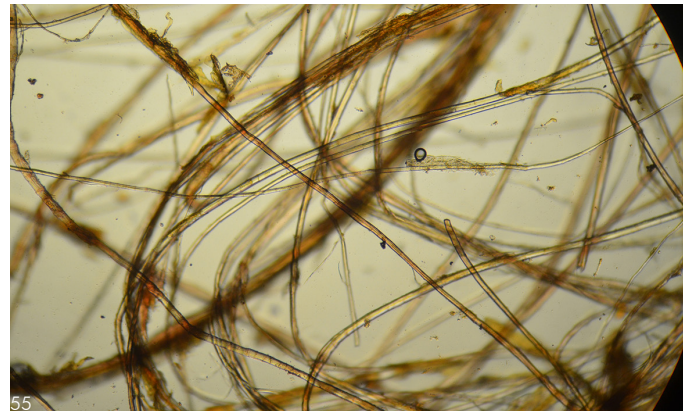
52



53



54



55

32 Nombre científico:

Linum usitatissimum

33 Enriado: Meter en el agua por algunos días el lino, cáñamo o esparto para su maceración. [57]

34 Nombre científico: *Cannabis Sativa*

Imagen 52 _ Proceso de Enriado. [58]

Imagen 53 _ Golpeo del Lino. [58]

Imagen 54 _ Fibras de Cáñamo. (Fuente Propia)

Imagen 55 _ Fibra de Cáñamo. Vista por el microscopio. (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

- 35 Citan a Kostuch, J.A.,Walters, G.V., Jones, T.R., 1993. High Performance Concrete Incorporating Metakaolin — a review. Concrete 2000. University of Dundee, pp. 1799–1811.
- 36 Qian, X., Li, Z., 2001. The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. Cement and Concrete Research 31, 1607–1611

4.2.3. Procesos para mejorar la durabilidad del compuesto

4.2.3.1. Reducción de la Alcalinidad

La reducción de la alcalinidad en la matriz viene dada por el remplazo de una parte del WC por MK. Este material está conformado por partículas que al entrar en contacto con un medio húmedo, a temperatura ambiente, reaccionan con el hidróxido de calcio (CH) fruto de la hidratación del cemento formando tobermorita (CSH) y aluminatos dicálcicos hidratados, a quienes se les atribuye la mayor parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los compuestos cementíceos [52][53].

Según Siddique, J. y col.³⁵; y, Gonçalves, L. y col. [53], [54], indican que el CH es reducido significativamente en remplazos del 10 – 20 % y sobre valores del 20% el MK elimina completamente todo el CH del hormigón. Además por encima del 30% actúa como un agente acelerador de fraguado y una reducción del tamaño de poro.

De igual forma ambos artículos [53], [54] citan a Qian and Li³⁶, quienes investigan sobre las resistencias a tracción y flexión del concreto con remplazos del 0%, 5%, 10% y 15% de MK, estos resultados se observan en la Tabla 14, donde conforme

aumenta la cantidad de MK aumenta las respectivas resistencias mecánicas.

	Metakaolin content (% mass)			
	(0%)	(5%)	(10%)	(15%)
Tensile strength (MPa)	3.35	3.58	3.88	4.29
Bending strength (MPa)	4.65	4.74	6.16	6.40

Gonçalves y col. [54], aseguran que para un 30% de remplazo en peso de MK, todo el CH fruto de la hidratación del cemento es consumido, incluso con remplazos menores de 20% ya no existía CH en las muestras. Por tanto, concluyen que a partir de esta cantidad el MK sólo actuaría como relleno.

Es por ello, que en el planteamiento de la Campaña Experimental se usa como una adición, remplazando el 30% en peso del WC con MK. Con ello se pretende reducir la alcalinidad de matriz, mejorando la durabilidad de la fibra y por ende del compuesto final.

De igual manera, los autores Gonçalves y col. [54], aseguran que las puzolana funcionan como adiciones a los compuestos cementicios (pastas, morteros, hormigones), con los cuales se puede reducir las emisiones de CO² y el consumo de energía, contribuyendo a una reducción del impacto ambiental asociado a la elaboración de cemento.

Tabla 14 _ Resistencias de tracción y flexión de hormigón con diferentes remplazos de meta-caolín. [53]

4.2. Definición de la Campaña Experimental

4.2.3.2. Lavado y cornificación de la Fibra

Se toma como referencia la investigación de Claramunt y col. en "The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites", donde las fibras son sometidas a un proceso de lavado y secado con el objetivo de mejorar su rendimiento y durabilidad en un compuesto cementíceo. [31]

La fibra originalmente posee una resina propia del material, que impide la absorción de líquidos, evitando una buena adherencia fibra-matriz. Para solventarlo, se realiza un proceso similar al visto anteriormente, en el cual sometemos a los NW a un tratamiento de "lavado y secado".



Con ello se pretende mejorar la adherencia fibra-matriz, limpiar la fibra de impurezas, ganar estabilidad dimensional del NW y reducir el valor de retención de agua de la fibra; sin modificar la resistencia mecánica de la materia prima.

Tratamiento de la Fibra: Lavado y Secado

1. Cortar la fibra en cuadrados de 32 x 32 cm. (no se puede cortar con la medida exacta final, debido a que después del lavado la fibra sufre modificaciones en su formato y dimensión).
2. Se sumerge uno por uno los NW en un recipiente plano con agua a temperatura ambiente, hasta llegar a un total de 10 láminas.
3. Se presiona las fibras manualmente y se cambia el agua hasta obtener un color cristalino.
4. Se elimina el agua y se presiona manualmente los NW para eliminar el exceso.
5. Se coloca una lámina de "papel secante"³⁷ por debajo y encima de los NW.
6. Finalmente se introduce las fibras (en un recipiente adecuado) a la estufa ventilada, a 60°C durante 24 horas aproximadamente (tiempo en que tarda en secar la fibra).

37 El papel secante evita que los NW se peguen al recipiente, y a la vez, absorbe las impurezas de la fibra mientras el agua se evapora.

Imagen 56 _ Fibra sin lavado. Dificil absorción de agua. (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

84



1. Sumergir las fibras una a una en una bandeja con agua.



2. Se debe presionar la fibra para que se moje completamente.



3. El agua se vuelve turbia mientras se presiona manualmente la fibra.



4. Cambiar el agua las veces que sea necesaria.



5. Cuando el agua toma un color cristalino se retira el exceso y se presiona manualmente.



6. Finalmente se coloca un papel secante por arriba y abajo antes de meter las fibras al horno.

Imagen 57 _ Imágenes del Tratamiento de la Fibra (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental



A. Las hojas de papel secante absorben las impurezas de la fibra. En el primer ciclo el papel queda bastante manchado.



B. En el último ciclo el papel sale mucho más claro en comparación al primero.

Este proceso se realiza cuatro veces. Al final, veremos que el papel secante sale más claro que en el primer ciclo. Por otro lado, el NW es más firme y estable dimensionalmente.

Por último se corta nuevamente los NW en su tamaño final, 29 x 29 cm.

4.2.4. Dosificación del panel de VFRCC

Dosificación de la Matriz

Se preparan dos matrices, una para cada capa de la placa:

- Capa Externa: Mortero = 1:1:1,5 [aglomerante (70% WC + 30% MK), árido, agua]
- Capa Interna: Pasta = 1:0,7 [aglomerante (70% WC + 30% MK), agua]

Para el panel que tiene color en su capa exterior, se utiliza un 15% en peso de pigmento, referido al aglomerante:

- Capa Externa: 1:1:1,5 [aglomerante (59,5% WC + 25,5%MK + 15% pigmento), árido, agua]

Dosificación del Refuerzo

Se utilizan 4 capas de NW de Lino y Cáñamo.

Imagen 58 _ Secado de las fibras. A) Primer ciclo de secado. B) Último ciclo de secado (Fuente Propia)

4.2. Definición de la Campaña Experimental

86

4.2.5. Método de fabricación

4.2.5.1. Sistema Hastchek original

A manera muy simplificada se explica el método de fabricación Hastchek. Una suspensión muy diluida de cemento y fibras es colocada en un tanque de agitación constante, mediante un rodillo tamiz el fibrocemento fresco es depositado en la banda transportadora, aquí se retira el exceso de agua de la mezcla mediante un sistema de vacío y se obtiene un "fieltro de fibrocemento" con un espesor de un 1mm aproximadamente.

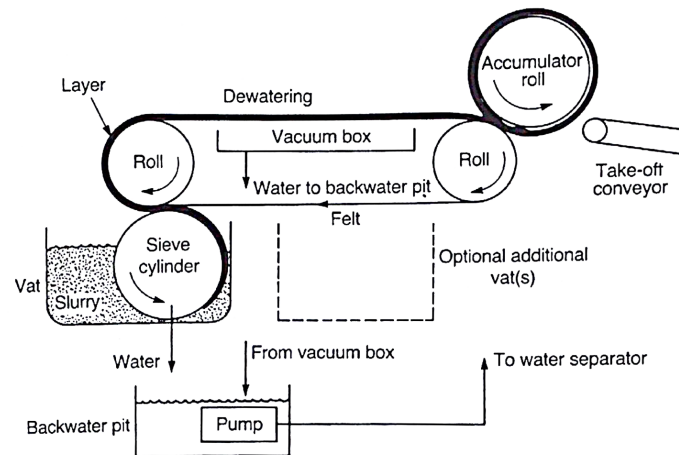


Imagen 59 _ Proceso de elaboración Hastchek para tableros de asbesto-cemento. [61]

La banda transportadora deposita este fieltro en el cilindro acumulador, hasta obtener el grosor del tablero deseado. Finalmente el producto se deposita en una prensa para comprimirlo y curarlo. Todo el proceso es bastante rápido por lo que el costo de producción es bajo. [61] (Imagen 57)

4.2.5.2. Adaptación del Sistema Hastchek

Haciendo referencia a la Imagen 58, el molde que se utiliza se denomina Caja Hastchek. Esta conformado por dos partes : en la superior (a manera de bandeja perforada) donde se coloca el fibrocemento fresco; mientras que en la parte inferior se recoge el agua fruto de la succión por vacío, a través de la boquilla y la ayuda de un compresor. Con este procedimiento se elimina el exceso de agua de la mezcla inicial.

Posteriormente la placa es comprimida por una prensa para extraer el sobrante de agua, aire y garantizar una mejor unión de sus partículas.

4.2. Definición de la Campaña Experimental

Molde y su preparación

La caja Hastchek se encuentra fabricada en platinas de acero inoxidable con un espesor de 9mm. y se utiliza para elaborar placas de fibrocemento. El compartimento superior cuyas dimensiones internas son 300 x 300 mm, posee su base perforada con finos agujeros ($\varnothing < 1\text{mm}$) dispuestos en una grilla de 10mm.

Antes de comenzar la elaboración de paneles, es necesario preparar el molde. Debe estar sumamente limpio y seco, para no contaminar la mezcla. Entre las dos partes se colocan gomas, para garantizar la estanqueidad del compartimento inferior y no permitir la entrada de aire cuando se realice el vacío.

Posteriormente se coloca con una brocha el desencofrante y dos láminas de papel secante³⁸ en la base agujereada, para evitar perder aglomerante al momento del vacío y facilitar el desencofrado.

Finalmente se conecta la boquilla a la manguera del compresor.

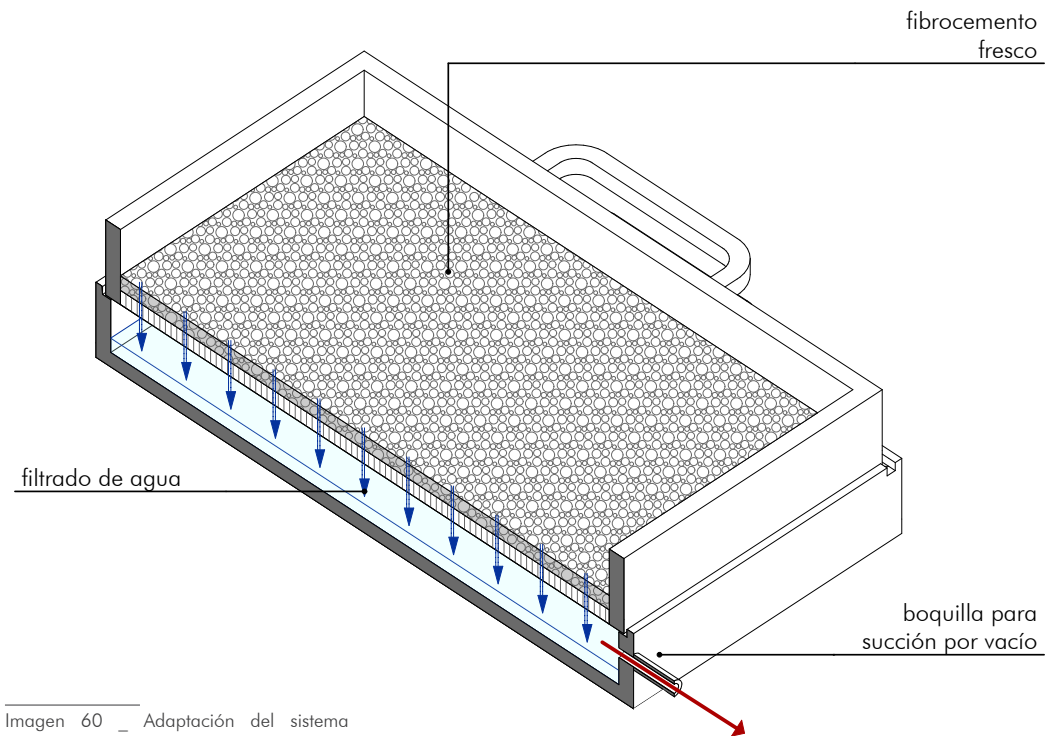


Imagen 60 _ Adaptación del sistema Hastchek usada por Savastano Jr. (Fuente Propia)

38 Con una dimensión de 29,20 x 29,20 cm.

4.2. Definición de la Campaña Experimental

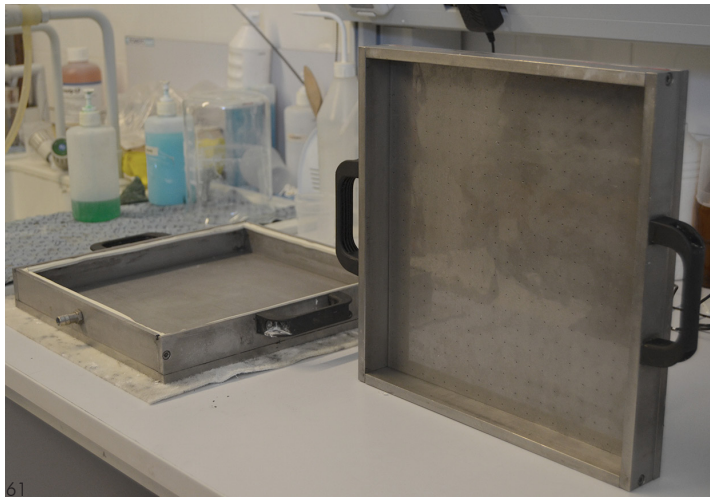
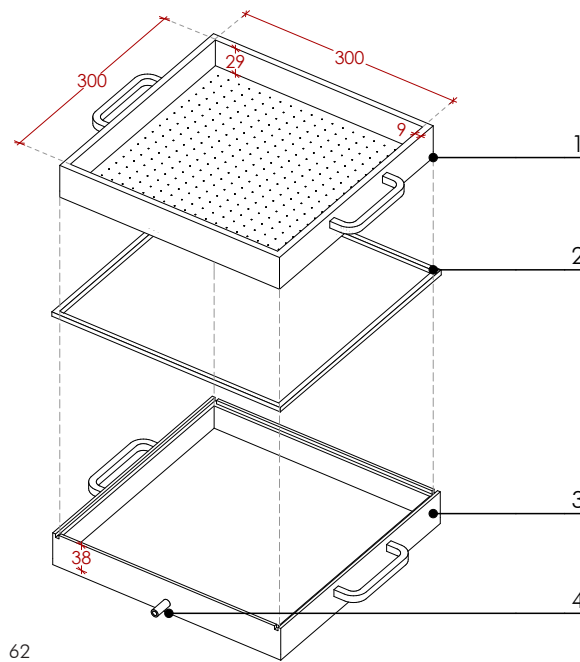
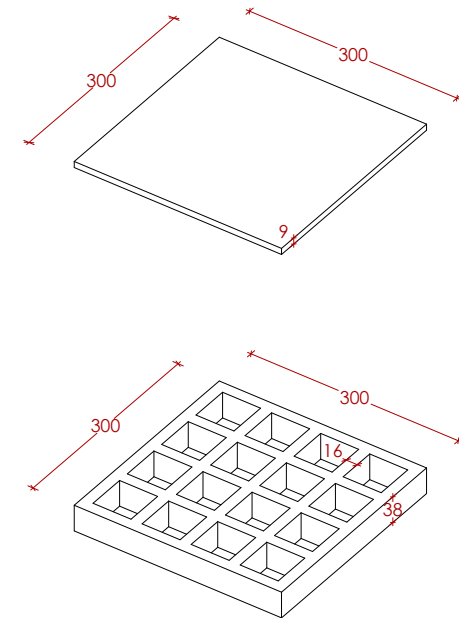


Imagen 61 _ Fotografía del molde (Fuente Propia)

Imagen 62 _ Caja Hastchek / Elementos para la compresión del VFRCC (Fuente Propia)

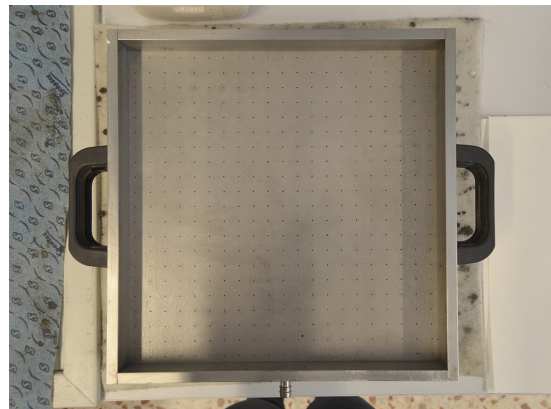


- 62
1. Compartimento superior
 2. Gomas
 3. Compartimento Inferior
 4. Boquilla para generar vacío.

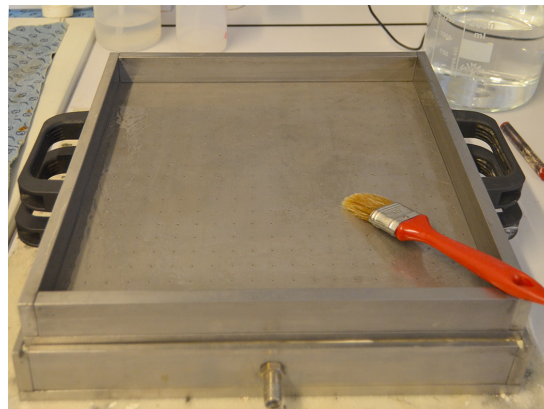


Elementos que ayudan a comprimir el panel en la prensa para obtener el producto final.

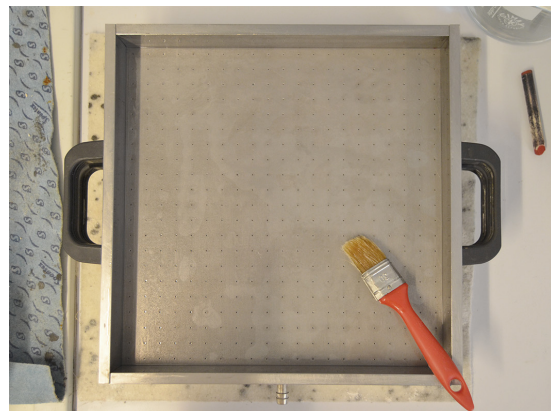
4.2. Definición de la Campaña Experimental



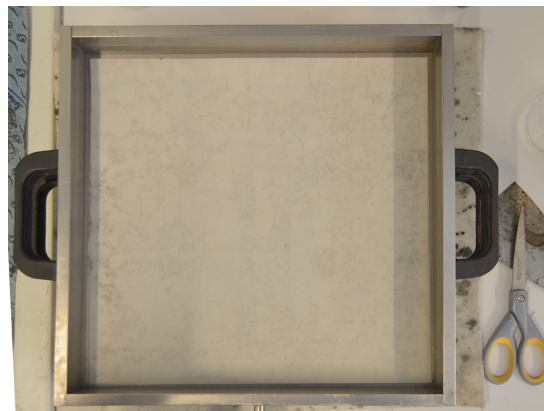
1. Se limpia y seca el molde



2. Empapar el molde con una capa de aceite para desencofrar.



3. Se coloca el primer papel y lo moja con aceite.



4. Finalmente se coloca el segundo papel y se lo en aceita.

Imagen 63 _ Imágenes de preparación del molde. (Fuente Propia)

4.3. Selección de ensayos de caracterización para la Campaña Experimental

Por tratarse de un acercamiento inicial (a los VFRCC, normativa, etc.) que servirá de base para una futura tesis doctoral, y no una validación del material a nivel comercial, se selecciona los ensayos más relevantes, a la vez que se decide reducir el número mínimo de muestras en algunos de los ensayos, (Tabla 15).

Los ensayos tiene dos direcciones predominantes, por un lado están aquellos que permitirán validar la durabilidad de la fibra, y por tanto la del compuesto en sí: ensayo de resistencia a flexión, inmersión y secado, envejecimiento natural, micrografía SEM. Y por otro lado, pruebas que nos aportaran con datos de uso más arquitectónico: ensayo de resistencia a flexión, impermeabilidad al agua, variación dimensional, sensores de temperatura, color en el material, densidad, dureza superficial y mecanizaciones.

Fue necesario seguir una rigurosa planificación para lograr cumplir todas las pruebas establecidas. En el Anexo 9.7 se adjunta los calendarios de trabajo: el primero de la elaboración de los paneles, y el segundo de los ensayos.

4.3. Selección de ensayos de caracterización para la Campaña Experimental

Tabla 15 _ Selección de ensayos. (Fuente Propia)

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN / NORMATIVA / NÚMERO DE MUESTRAS								
CÓDIGO	CARACTERÍSTICAS	NORMA	NÚMERO DE MUESTRAS SEGÚN LA NORMA	NÚMERO DE MUESTRAS TOMADAS	MÉTODO DE EVALUACIÓN SEGÚN NORMA		CRITERIO DE CONFORMIDAD SEGÚN NORMA	
A	Impermeabilidad agua	UNE EN 12467:2013	3 placas de ensayo	3 placas de ensayo	Anexo 8.3	7.3.3.	Anexo 8.3	5.4.5
B	Resistencia mecánica	UNE EN 12467:2013	Al menos 10 muestras	5 muestras	Anexo 8.3	7.3.2	Anexo 8.3	Tabla 6 del apartado 5.4.3
C	Variaciones dimensionales	UNE EN 12467:2013	Al menos 10 muestras	4 muestras	Anexo 8.3	7.2	Anexo 8.3	5.3
D	Inmersión - secado	UNE EN 12467:2013	Al menos 10 muestras	5 muestras	Anexo 8.3	7.3.6	Anexo 8.3	5.5.5
E	Envejecimiento natural	---	---	3 placas de ensayo				
	E.1. Resistencia mecánica	UNE EN 12467:2013	Al menos 10 muestras	5 muestras/placa	Anexo 8.3	7.3.2		
	E.2. Sensores de temperatura	---	---	2/placa				
	E.3. Registro de humedad relativa del material	---	---	3 puntos de control /placa				
	E.4. Escaneo de la superficie antes y después del envejecimiento	---	---	3 placas de ensayo				
F	Densidad aparente	UNE EN 12467:2013	Inspección por variable, método d o s	1 muestra	Anexo 8.3	7.3.1	Anexo 8.3	5.4.2
G	Dureza superficial	Dureza de Vickers	---	25 puntos				
H	Mecanizaciones	---	---	---				
I	Micrografía SEM	---	---	---				

4.4. Metodología de los ensayos

4.4.1. Ensayos bajo la norma UNE EN 12467:2013

La metodología a seguir como se observa en la Tabla 15, es aquella que rige la Norma UNE EN 12467:2013.

Dado que esta norma no dicta parámetros en cuanto a la elaboración de los paneles en sí, se ha tomado como referencia para la elaboración de la matriz cementícea la Norma UNE 196-1 “Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas”.

De igual forma, los cortes que se realizan a los paneles para la realización de los distintos ensayos están basados en la Norma UNE 88412 como se vio anteriormente.

4.4.2. Ensayos bajo otra normativa o procedimiento

4.4.2.1. Ensayo de Envejecimiento Natural

Los paneles utilizados fueron: un blanco, un amarillo y un gris. Colocados de forma vertical (separados del suelo), para simular su uso en una fachada.

Fue realizado entre 1 de agosto al 29 de septiembre, sometiendo a las muestras a la intemperie. El panel blanco y gris estuvieron al exterior durante 60 días, mientras que el panel amarillo durante 54 días.

Cada panel fue dotado de dos células de temperatura, para medir la temperatura externa e interna del material. Estos sensores eran conectados a Data Loggers (aptos para intemperie), los cuales registraban las temperaturas cada 10 min. con una precisión de 0,20°C.

Montaje de los paneles

1. Pulido del panel: Se pule los paneles por la cara exterior, con el fin de simular un panel comercial, con un acabado liso. Para ello se utiliza un taladro BOSH con un disco para pulir. Se emplea agua en el pulido y

4.4. Metodología de los ensayos

se utiliza lijas #500 (tiempo: 3'), #800 (tiempo: 2'30"), #2500 (tiempo: 2'30") y finalmente con una suspensión de polvo de diamante $6\mu\text{m}$ (tiempo: 2'30").

2. Escaneo de la superficie: Para realizar la prueba de la duración en el compuesto, se escanea la superficie antes y después del tiempo de envejecimiento (60 días). Se utiliza un escáner que no permite el ingreso de luz que influya en el resultado.
3. Colocación de sensores de temperatura: Se coloca dos sensores de temperatura según la Imagen 64. Los sensores son colocados desplazados del centro de la pieza, quedando de tal manera que el sensor de la cara exterior no haga sombra al su opuesto en la cara posterior. Los sensores están protegidos del ambiente exterior mediante una "caja" de poliestireno expandido, la cual en su interior contiene pasta térmica que transmite todo el calor del panel a la célula. Esta caja fue sellada al panel con silicón.
4. Montaje en la estructura de soporte: La estructura de soporte son cajas plásticas de fruta, a las cuales se fijan los paneles por sus cuatro esquinas con la ayuda de alambre plastificado. Finalmente se coloca material de lastre por la parte posterior de las cajas para evitar el movimiento.

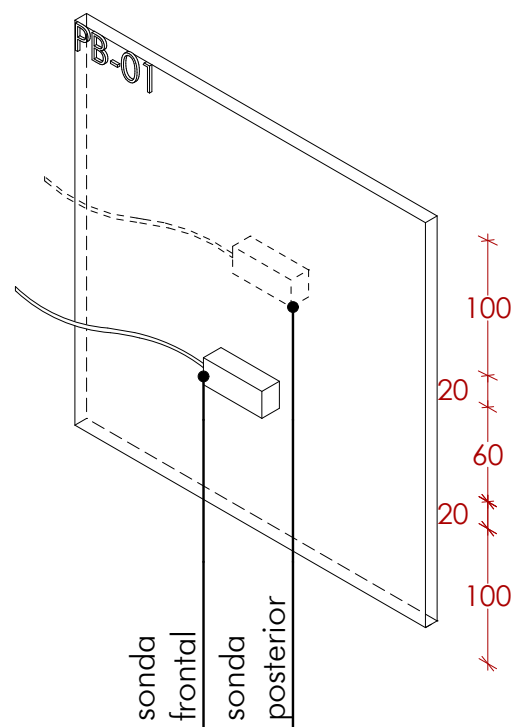
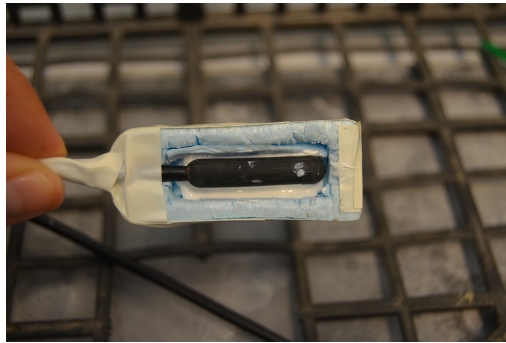


Imagen 64 _ Colocación de los sensores de temperatura (Fuente Propia)

4.4. Metodología de los ensayos

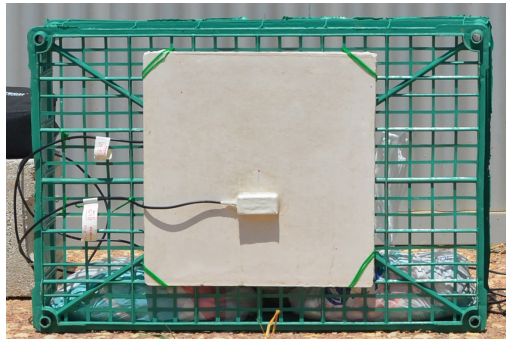
94



a. Caja de poliestireno expandido con el sensor de temperatura y la pasta térmica



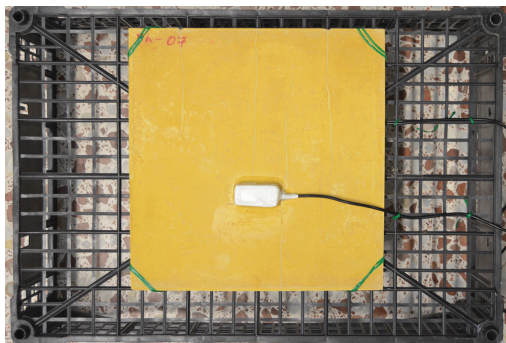
b. Lastre en la parte posterior de las cajas plásticas



c. Cara exterior del panel blanco, colocada al exterior



d. Cara posterior del panel blanco, con el sensor de temperatura



e. Cara exterior del panel amarillo con el sensor de temperatura



f. Cara posterior del panel amarillo.

Imagen 65 _ Imágenes del montaje de los paneles (Fuente Propia)

5. Campaña Experimental

- 5.1. Generalidades
 - 5.2. Elaboración de los Paneles de VFRCC
 - 5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC
-

5.1. Generalidades

Se inicia el 13 de mayo del 2014 con la familiarización del laboratorio, materiales utilizados, equipos empleados y preparación del NW (cortado, lavado, secado y cortado nuevamente). Finalmente la campaña se da por terminada el día 27 de noviembre con la realización de la micrografía SEM.

Para la campaña experimental se realizan seis (6) paneles de color blanco y un (1) panel de color amarillo. También se cuenta con un (1) panel de color gris³⁹, realizado por un grupo de investigación⁴⁰, el cual será usado para comparar el envejecimiento natural de otra matriz, la temperatura del material y su color.

La Norma utilizada, UNE EN 12467:2013, plantea una clasificación de los paneles de fibrocemento según los resultados de los ensayos. De acuerdo con ella se plantean unos objetivos a los cuales se desea llegar.

- 39 Elaborado con cemento gris, humo de sílice y seis capas de NW de fibras de lino y cáñamo.
- 40 El grupo de investigación está formado por profesores multidisciplinares de la UPC.

5.1. Generalidades

98

CLASIFICACION SEGÚN LA NORMA UNE EN 12467:2013				
CLASIFICACIONES SEGÚN:	TIPOS	CRITERIOS	OBJETIVO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	
RESISTENCIA A LA INTEMPERIE	Categoría A	Puede estar sometidas a calor, humedad elevada y fuertes heladas.		
	Categoría B	Pueden estar sometidas a calor, humedad y alguna helada ocasional.	✓	
	Categoría C	Aplicaciones en interiores, pueden estar sometidas a calor y humedad pero no a heladas.		
	Categoría D	Aplicaciones sobre capa rígida.		
RESISTENCIA AL MOMENTO FLECTOR	Clase 1	Categoría A y B	4 Mpa	
		Categoría C y D	4 Mpa	
	Clase 2	Categoría A y B	7 Mpa	
		Categoría C y D	7 Mpa	
	Clase 3	Categoría A y B	13 Mpa	
		Categoría C y D	10 Mpa	
	Clase 4	Categoría A y B	18 Mpa	
		Categoría C y D	16 Mpa	
	Clase 5	Categoría A y B	24 Mpa	✓
		Categoría C y D	22 Mpa	
GRUPO DIMENSIONAL	Pequeño tamaño	Método de instalación por super-posición. Generalmente su superficie es $<0,4 \text{ m}^2$ y la relación longitud/anchura es ≤ 3	✓	
	Gran tamaño	También pueden ser consideradas de "pequeño tamaño" siempre que sus tolerancias sean las de una placa pequeñas.		
TOLERANCIAS DIMENSIONALES*	Nivel I	$\pm 3 \text{ mm}$	✓	
	Nivel II	$\pm 4 \text{ mm}$		

Tabla 16 _ Clasificación de los paneles según la Norma UNE 12467:2013. [8]

*Referidas a las placas cuya medida nominal sea $a \leq 600 \text{ mm}$

5.2. Elaboración de los paneles

5.2.1. Preparación de las matrices

La preparación de las matrices está calculada para un panel. Se prepara de manera simultánea las dos, para que el inicio del fraguado sea el mismo.

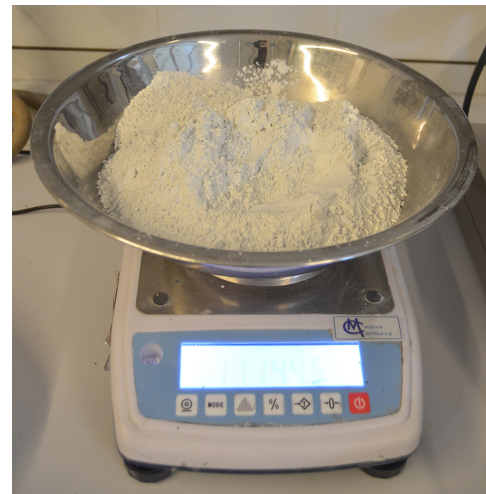
Capa Externa: Mortero de Cemento

1. Pesamos los ingredientes necesarios para la elaboración de las matrices, utilizando las cantidades indicadas en el la Tabla 17 para los paneles blancos y en la Tabla 18 para el panel amarillo. Las cantidades de la pasta de la capa interna no están calculadas de manera exacta, puesto que la fibra debe sumergirse y absorber la mezcla, por tanto al final de la elaboración se tiene un sobrante.
2. Se colocan el cemento y meta-caolín en un recipiente y se mezclan en seco con la ayuda de una espátula, hasta que los ingredientes estén bien combinados.
3. Se coloca la mitad del agua en el recipiente, se añade la mezcla anterior y se colocan en la Amasadora, finalmente se añade el resto del agua. Inmediatamente después se comienza a batir, a velocidad baja (140 rpm.). Luego de los primeros 30 seg. de amasado, se agrega el árido durante 30 seg. y se continúa batiendo

durante 120 seg. mas. Dada la elevada relación A/C no se puede elevar la velocidad de la amasadora, puesto que salpica la mezcla.

Capa Interna: Pasta de Cemento

Se procede igual que la anterior, con la diferencia que no hay árido. Pero el tiempo de amasado es el mismo, 180 seg.



a. Pesar los materiales

5.2. Elaboración de los paneles

100

DOSIFICACIÓN BÁSICA PARA PANELES BLANCOS								
CAPAS	DOSIFICACION*	AGLOMERANTE			ÁRIDO SIBELCO 500	PIGMENTO	AGUA	TOTAL
		CEMENTO 70%	META.CAOLÍN 30%	TOTAL AGLM. 100%				
		gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr
CAPA EXTERIOR	1:1:1,50	210,00	90,00	300,00	300,00	0,00	450,00	1050,00
CAPA INTERIOR	1:0,7	1715,00	735,00	2450,00	0,00	0,00	1715,00	4165,00
TOTALES		1925,00	825,00	2750,00	300,00	0,00	2165,00	5215,00

* aglomerante : árido : agua / aglomerante : agua

Aglomerante = 70% cemento + 30% metacaolín

DOSIFICACIÓN BÁSICA PARA PANEL DE COLOR AMARILLO								
DOSIFICACIONES	DOSIFICACION*	AGLOMERANTE			ÁRIDO SIBELCO 500	PIGMENTO 15%	AGUA	TOTAL
		CEMENTO 70%	META.CAOLÍN 30%	TOTAL AGLM. 100%				
		gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr
CAPA EXTERIOR	1:1:1,50	178,50	76,50	255,00	300,00	45,00	450,00	1050,00
CAPA INTERIOR	1:0,7	1715,00	735,00	2450,00	0,00		1715,00	4165,00
TOTALES		1893,50	811,50	2705,00	300,00	45,00	2165,00	5215,00

* aglomerante : árido : agua / aglomerante : agua

Aglomerante = 70% cemento + 30% metacaolín

Tabla 17 _ Dosificación del panel blanco

(Fuente Propia)

Tabla 18 _ Dosificación del panel amarillo.

(fuente Propia)

5.2. Elaboración de los paneles

5.2.2. Enmoldado del panel

Se comienza el enmoldado inmediatamente después de preparar las mezclas. Previamente se prepara los 4 NW de fibra (los cuales fueron tratados según 4.2.3.2. Lavado y cornificación de las fibras), y se registra su peso.

1. Se coloca la mitad de la mezcla de la capa externa en el molde previamente preparado (4.2.5.2. Adaptación del sistema Hastchek). Se extiende con la ayuda de una espátula y se realiza vacío durante 10 seg.
2. Se vierte $\frac{1}{4}$ de la mezcla de la capa interna en una bandeja plana. Se sumerge completamente una capa de fibra en la pasta de cemento, hasta que esté completamente empapada.
3. Teniendo la precaución de no dañar el NW se coloca en el molde y se lo extiende manualmente procurando no dejar burbujas de aire y/o arrugas.
4. Con la ayuda de una espátula se revuelve la mezcla de la capa interna, se añade otro $\frac{1}{4}$ de la pasta de cemento y se repite el proceso con cada uno de los NW.
5. Una vez colocadas las fibras en el la caja Hastchek, se enciende el compresor de aire para generar vacío en el compartimento inferior del molde. Se lo mantiene encendido durante 30 seg. hasta observar que la mezcla

pierde el brillo (por el agua) y se vuelve mate.

6. Se coloca la otra mitad del mortero de la capa externa y se reparte homogéneamente con un espátula.
7. Nuevamente realizamos vacío por otros 10 seg.
8. Por último se coloca dos capas de papel secante previamente untadas con aceite desencofrante, para ayudar al desmolde de la pieza después de la compresión.



b. Mezcla de cemento blanco y metacaolín



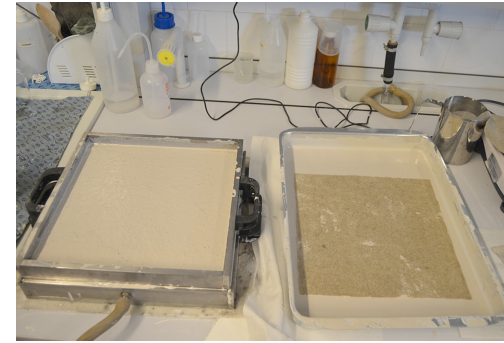
c. Papel secante y no-tejidos de fibra de lino y cáñamo

5.2. Elaboración de los paneles

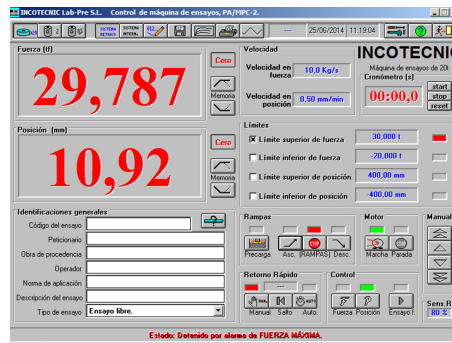
102



d. Mezcla en el mixer



e. Empapar la fibra en la pasta de cemento y pasarla al molde Hastchek.



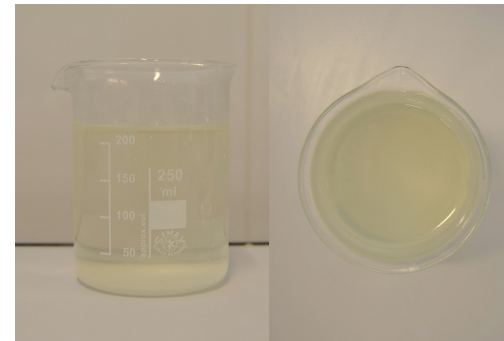
f. Compresión hasta 30Tn.



g. Desmoldado del panel



h. Colocación en el armario de curado



i. Registrar pesos de mezcla sobrante y agua luego de la succión por vacío y compresión.

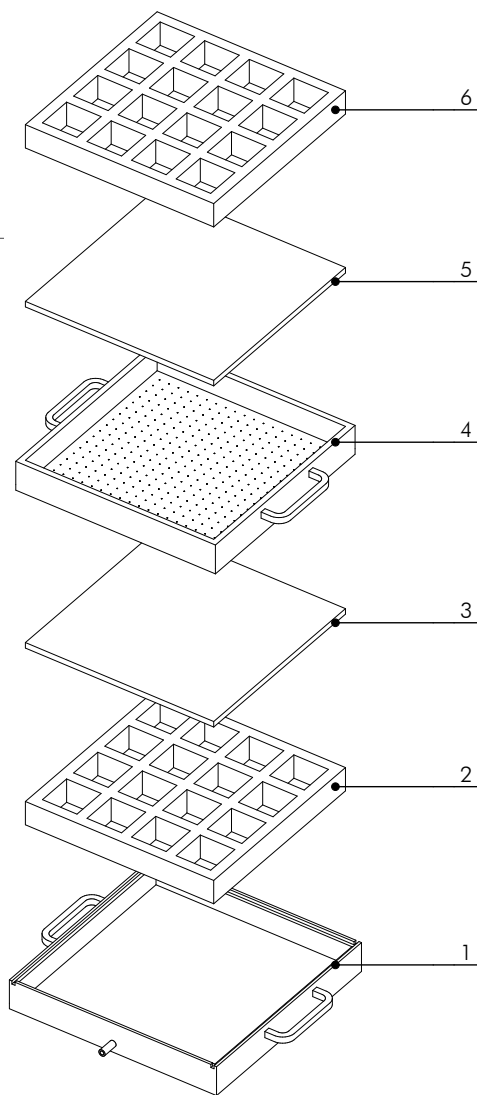
Imagen 66 _ Imágenes de la preparación de los paneles (Fuente Propia)

5.2. Elaboración de los paneles

Compresión del Panel

Se utiliza una prensa provista con un célula de carga de 30 Tn. Configurada con una rampa de subida a velocidad de 0,50 mm/min.

1. Se coloca en la prensa las distintas partes del molde, siguiendo el orden que se indica en la Imagen 67.
2. Se inicia la rampa de subida con la velocidad establecida hasta ejercer una presión de 30 Tn.
3. Cuando se llega a este valor se deja comprimir la pieza durante 20 min.
4. Se retira la presión utilizando una rampa de bajada con la misma velocidad.
5. Finalmente se desmolda la pieza sobre una plancha plana y se la coloca en el armario de curado durante 28 días a $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ y a 95 -100 % de humedad relativa.



LEYENDA

1. Compartimento inferior del molde.
2. Base para comprimir.
3. Plancha de acero.
4. Compartimento superior con el FIBROCEMENTO FRESCO.
5. Plancha de acero para alisar el panel.
6. Segunda base para comprimir.

Imagen 67 _ Orden de los elementos para la compresión del panel.
(Fuente Propia)

5.2. Elaboración de los paneles

104

5.2.3. Cuadro de resumen de cantidades empleadas

En la Tabla 19 y Gráficas 9-12 se pueden observar las cantidades utilizadas en las distintas capas y en el panel en sí, restando el material sobrante y el agua extraña por vacío y compresión.

Tabla 19_ Cantidades reales utilizadas en la elaboración de los paneles
(Fuente Propia)

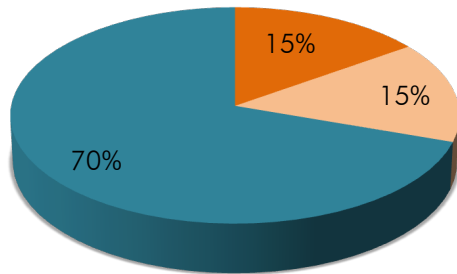
* Dosificación Básica

** Dosificación Color

CANTIDADES REALES DE MATRICES Y FIBRA EN CADA PANEL																	
FECHA	COD. PANELES	CANTIDAD INICIAL DE PREPARACIÓN						CANTIDAD SOBRANTE DE LA CAPA INTERIOR		CANTIDAD UTILIZADA EN CADA PANEL						FIBRA	
		CAPA EXTERIOR		CAPA INTERIOR		CANTIDAD TOTAL REALIZADA				CAPA EXTERIOR		CAPA INTERIOR		CANTIDAD TOTAL UTILIZADA		CANTIDAD	PESO
		gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	gr.	%	no.	gr.
25/06/14	PB-01*	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.748,50	33,53%	1.050,00	30,29%	2.416,50	69,71%	3.466,50	66,47%	4,00	63,30
26/06/14	PB-02*	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.677,55	32,17%	1.050,00	29,68%	2.487,45	70,32%	3.537,45	67,83%	4,00	45,90
23/06/14	PB-03*	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.485,05	28,48%	1.050,00	28,15%	2.679,95	71,85%	3.729,95	71,52%	4,00	62,57
23/06/14	PB-04*	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.638,50	31,42%	1.050,00	29,36%	2.526,50	70,64%	3.576,50	68,58%	4,00	44,87
27/06/14	PB-05*	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.849,80	35,47%	1.050,00	31,20%	2.315,20	68,80%	3.365,20	64,53%	4,00	41,45
27/06/14	PB-06*	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.890,65	36,25%	1.050,00	31,59%	2.274,35	68,41%	3.324,35	63,75%	4,00	41,90
10/07/14	PA-07**	1.050,00	20,13%	4.165,00	79,87%	5.215,00	100,00%	1.959,80	37,58%	1.050,00	32,26%	2.205,20	67,74%	3.255,20	62,42%	4,00	68,35
MEDIA:								1.749,98	33,56%	1.050,00	30,30%	2.415,00	69,70%	3.465,02	66,44%	4,00	52,62

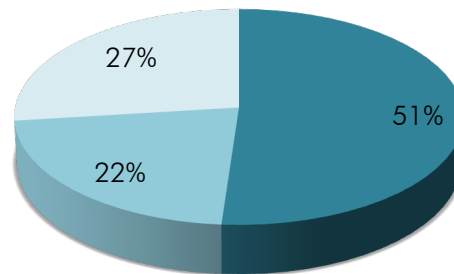
5.2. Elaboración de los paneles

PORCENTAJE DE MATRIZ EN LAS CAPAS DEL PANEL



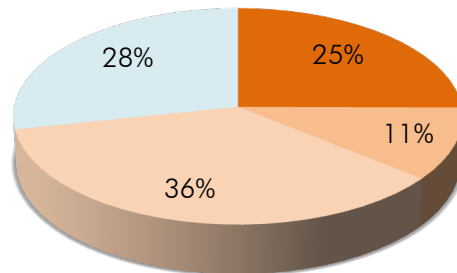
■ CAPA EXTERNA (Frontal)
 ■ CAPA EXTERNA (Posterior)
 ■ CAPA INTERNA

CAPA INTERNA - Porcentaje de Materiales



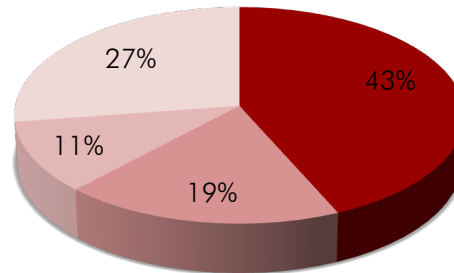
■ CEMENTO ■ META-CAOLÍN ■ AGUA

CAPA EXTERNA - Porcentaje de Materiales



■ CEMENTO ■ META-CAOLÍN
 ■ ÁRIDO ■ AGUA

PANEL - Porcentaje de materiales



■ CEMENTO ■ META-CAOLÍN
 ■ ÁRIDO ■ AGUA

Tabla 19 _ Cantidades reales utilizadas en la elaboración de los paneles (Fuente Propia)

Gráfica 9 _ Cantidades de matriz en cada capa del panel. (Fuente Propia)

Gráfica 10 _ Porcentajes de materiales en la capa interna. (Fuente Propia)

Gráfica 11 _ Porcentajes de materiales en la capa externa. (Fuente Propia)

Gráfica 12 _ Porcentajes de materiales en el panel. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.2.4. Relación A/C

COD. PANELES	RELACIÓN AGUA/AGLOMERANTE ESTIMADA			RELACIÓN AGUA/CEMENTO ESTIMADA		
	CAPA EXTERNA	CAPA INTERNA	RELACIÓN AGUA/ AGLOMERANTE DE LA PLACA	CAPA EXTERNA	CAPA INTERNA	RELACIÓN AGUA/ CEMENTO DE LA PLACA
	$(r=p/J)$	$(s=q/K)$	$(t=o/I)$	$(u=p/L)$	$(v=q/N)$	$(w=o/I)$
	A/A	A/A	A/A	A/C	A/C	A/A
PB-01	0,86	0,40	0,42	1,22	0,57	0,59
PB-02	0,73	0,34	0,47	1,04	0,49	0,68
PB-03	0,81	0,38	0,44	1,15	0,54	0,62
PB-04	0,82	0,38	0,40	1,17	0,55	0,57
PB-05	0,76	0,36	0,42	1,09	0,51	0,60
PB-06	0,76	0,35	0,47	1,09	0,51	0,67
MEDIA	0,80	0,40	0,44	1,10	0,50	0,62

Si bien se parte con una relación A/C establecida, luego de la succión por vacío y la compresión por la prensa, se elimina el agua sobrante del compuesto, por tanto la relación A/C real es desconocida.

Esta relación A/C estimada se obtiene a través de porcentajes, y para ello es necesario pesar y registrar los siguientes datos:

- La mezcla sobrante de la Capa Interna.
- El agua succionada por el vacío
- El agua eliminada por la compresión de la prensa.

Luego de un exhaustivo cálculo de los porcentajes de los materiales que se utilizan, los materiales sobrantes y el agua extraída (desarrollado en el Anexo 9.8), se obtiene el siguiente resultado: Tabla 20

Tabla 20 _ Relación A/C estimada de los compuestos. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.1. Equipos empleados

Todos los equipo utilizados en esta campaña experimental, se encuentran descritos en el Anexo 9.5.

5.3.2. Dimensiones y peso de los paneles luego de 28 días

Luego de los 28 días en el armario de curado, los paneles son sacados, medidos y pesados.

Las mediciones son tomadas en base a la normativa citada:

- Dimensiones: a 50 mm. de los bordes. Imagen 68
- Espesores: a 20mm. de los bordes. Imagen 69

Se utiliza una regla con precisión de 1mm. y un pie de rey con precisión de 0,05mm. Todas las medidas son tomadas en la cara frontal de la placa, aquella que se encontraba contra la base del molde, puesto que es la más lisa (Imagen 70).

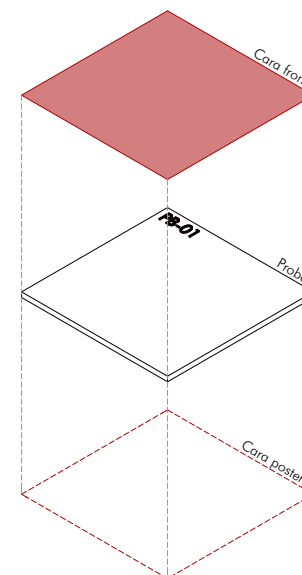
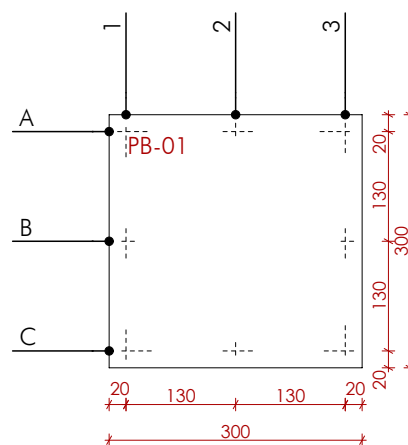
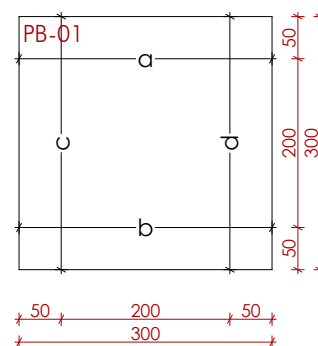


Imagen 68 _ Medición de las dimensiones de la placa. (Fuente propia)

Imagen 69 _ Medición de los espesores de la placa. (Fuente propia)

Imagen 70 _ Cara frontal, cara posterior. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



a. Toma de medidas



b. Toma de medidas



c. Pie de Rey

Imagen 71 _ Fotografías de la toma de medidas. (Fuente propia)

Tabla 22 _ Tolerancias de las medidas nominales según el valor y el nivel. [8]

Tabla 23 _ Tolerancias del espesor para placas sin relieve. [8]

5.3.3. Tolerancias dimensionales

Si bien, las tolerancias dimensionales no forman parte de la caracterización de los paneles, se las realiza para tener una perspectiva de los datos, a pesar de que el método fabricación es manual, no se rectifican o pulen los paneles, y no se trata de una validación de producto a nivel comercial.

La norma establece que:

Dimensiones		
Medida nominal a	Nivel I	Nivel II
$a \leq 600\text{mm}$	$\pm 3\text{mm}$	$\pm 4\text{mm}$

Espesores	
$6\text{mm} < e \leq 20\text{mm}$	$\pm 10\% e$

Y además se indica que “en las placas sin relieve, la diferencia máxima entre los valores extremos de las mediciones del espesor de una misma placa no deben exceder del 10% del valor máximo medido” [8].

Vemos que los paneles aprueban las tolerancias permitidas en cuanto a dimensiones y espesores, calificando en un Nivel I. Fallan en la máxima diferencia entre los valores extremos medidos del espesor. Obviamente, esto se debe a una fabricación manual y falta de pulido.

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

TOLERANCIAS DIMENSIONALES													
CÓDIGO DE PANEL	FECHA DE ELABORACIÓN	28 días	DIMENSIONES				ESPEORES				TOLERANCIA DIF. MAX-MIN ESPEOR		
			largo		ancho		e		máx	10% máx	CUMPLE (máx-mín) < 10% máx		
			mm.	CUMPLE	mm.	CUMPLE	mm.	CUMPLE	mm.	mm.			
PB-01	25-jun-14	23-jul-14	301,00	✓	301,50	✓	12,84	✓	14,00	1,40	✗		
									máx - mín	2,10			
PB-02	26-jun-14	24-jul-14	301,00	✓	301,00	✓	13,78	✓	14,75	1,48	✗		
									máx - mín	1,95			
PB-03	23-jun-14	21-jul-14	301,00	✓	300,00	✓	12,98	✓	13,85	1,39	✗		
									máx - mín	1,65			
PB-04	23-jun-14	21-jul-14	300,50	✓	301,00	✓	14,11	✓	14,70	1,47	✗		
									máx - mín	1,50			
PB-05	27-jun-14	25-jul-14	301,00	✓	301,00	✓	13,10	✓	13,40	1,34	✓		
									máx - mín	0,95			
PB-06	27-jun-14	25-jul-14	301,00	✓	300,50	✓	13,80	✓	14,90	1,49	✗		
									máx - mín	1,85			
PA-07	10-jul-14	7-ago-14	301,00	✓	301,00	✓	14,39	✓	15,60	1,56	✗		
									máx - mín	2,50			
TOLERANCIAS		NORMATIVA* * Nivel I	-3,0 mm	a	+3,0 mm	-3,0 mm	b	+3,0 mm	- 10% e	e	+ 10% e		
		VALORES	297,92	300,92	303,92	297,83	300,83	303,83	12,09	13,43	14,78		

largo=(a+b)/2

ancho=(c+d)/2

e=(A1+A2+A3+B1+B3+C1+C2+C3)/8

* Dimensiones tomadas inmediatamente después de sacar las probetas del armario de curado.

**NORMATIVA UNE-EN 12467:2013

Tabla 24 _ Tolerancias dimensionales de los paneles. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.4. A. Impermeabilidad al agua

Generalidades

Para evaluar la impermeabilidad al agua, se utilizan tres paneles: PB-01 / PB-02 / PB-03.

Objetivo a cumplir

Los paneles deben soportar 20 mm. de agua sobre ellos, durante 24 horas. Posterior a este tiempo “puede aparecer rastros de humedad en la superficie inferior de la placa, pero en ningún caso se deben formar gotas de agua”[8]

Procedimiento

- Posterior al tiempo de curado, se deja las probetas 7 días en ambiente laboratorio.
- Después, cada panel es colocado sobre una base elevada que permita la observación de la cara posterior del mismo, sin necesidad de moverlo.
- Sobre este se sella un bastidor, elaborado con una base de aluminio, procurando dejar la mayor superficie posible en contacto con el agua (250 x 250mm).
- Se llena con 20mm. de agua por encima de la cara

de la probeta, y se mantiene bajo estas condiciones en ambiente laboratorio durante 24 horas.

- Se observa su comportamiento durante la duración del ensayo y se comprueba el objetivo.

PB-01/PB-02/PB-03

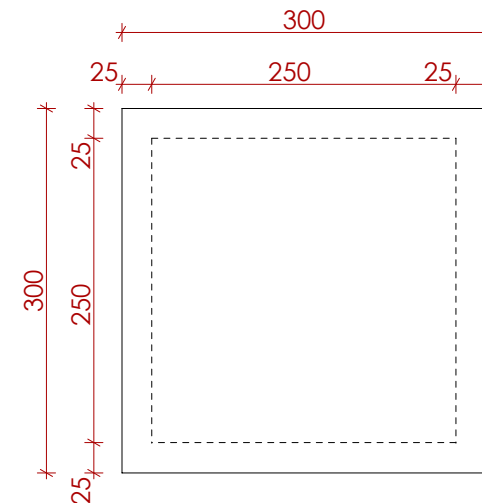
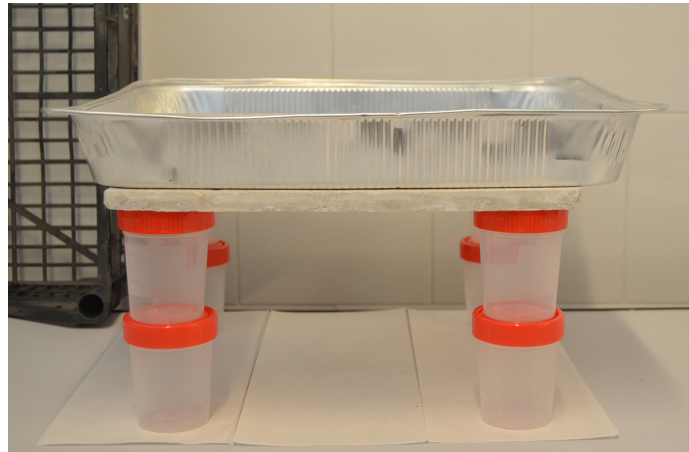
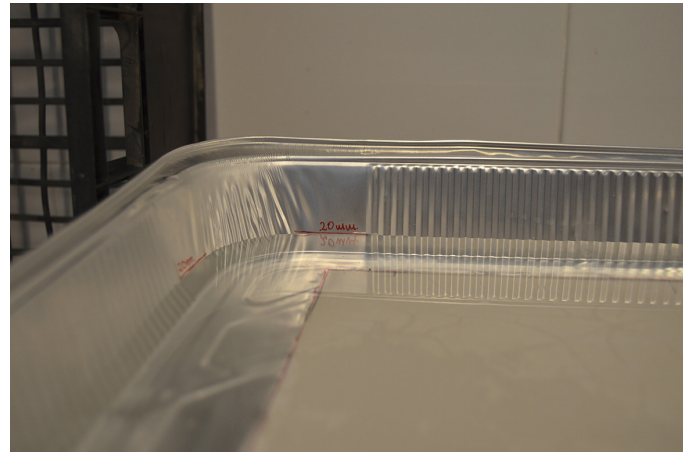


Imagen 72 _ Área de la probeta en contacto con el agua.
(Fuente propia)

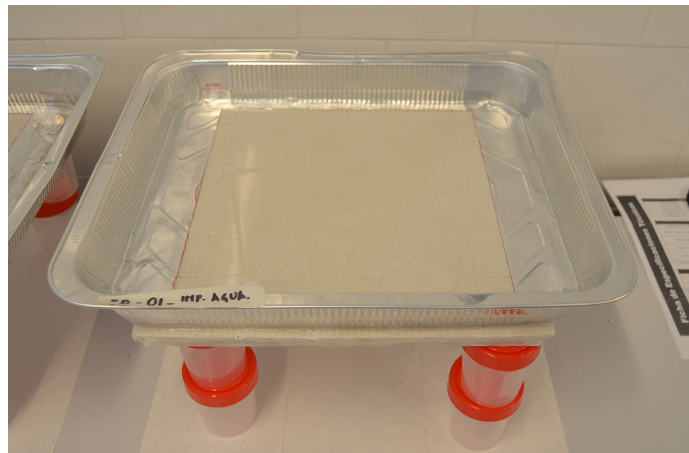
5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



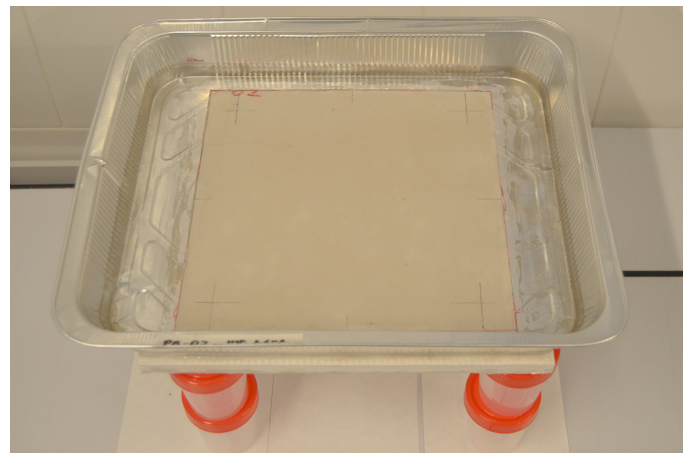
a. Se eleva el panel para poder observar la cara inferior sin necesidad de moverlo.



b. Se coloca 20 mm de agua en contacto con el panel.



c. Se deja reposar durante 24 horas



d. Panel con agua durante 28 días. Nótese el sedimento y color del bastidor de aluminio.

Imagen 73 _ Fotografías del montaje del ensayo. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.4. A. Impermeabilidad al agua

Resultados

Luego de 24 horas transcurridas se comprueba que no existe humedad en la superficie, esta completamente seca en las tres probetas.

Por esta razón, se decide dejar una de las probetas por un tiempo indeterminado y observar el comportamiento del panel.

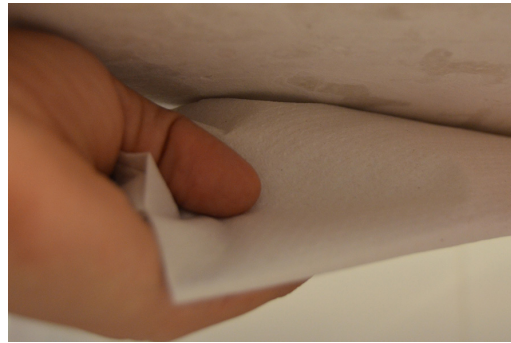
Después de 28 días, el panel aún se mantiene seco sin rastros de humedad, decidiendo dar por terminado el ensayo. de la probeta, y se mantiene bajo estas condiciones en ambiente laboratorio durante 24 horas.

A. ENSAYO DE IMPERMEABILIDAD AL AGUA									
Temp. Promedio del Laboratorio			25°C ± 3°C			HR del Laboratorio: 60% ± 5%			
CÓDIGO DE PANEL	FECHA DE INICIO	FECHA DE FIN	No. DE DÍAS u.	HUMEDAD EN LA CARA INFERIOR DE LA PLACA					IMPERMEABLE AL AGUA
	dd/mm/aa	dd/mm/aa		Seco 0	Poco Húmedo 1	Muy Húmedo 2	Gota 3	Muchas gotas 4	
PB-03	28/07/14	29/07/14	1	x					✓
PB-01	30/07/14	31/07/14	1	x					✓
PB-02*	31/07/14	28/08/14	28	x					✓

*PB-02 se mantiene por más días para observar el comportamiento del panel.

Tabla 25 _ Resultados de Impermeabilidad al agua. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



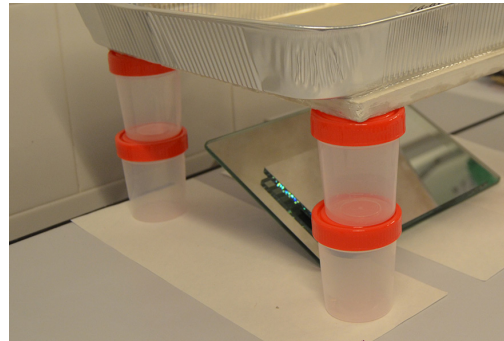
a. Se comprobó con papel absorbente.



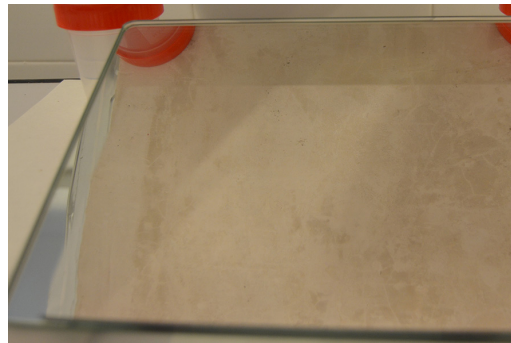
b. El papel se muestra completamente seco.



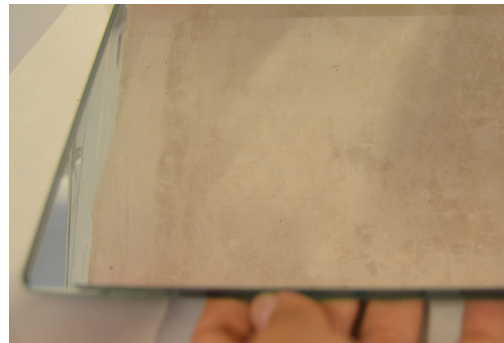
c. La superficie se mira totalmente seca.



d. Se colocó un espejo para una mejor observación



e. Vista de la imagen en el espejo.



f. Vista de la imagen en el espejo.

Imagen 74 _ Fotografías de la superficie inferior de los paneles.
(Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.5. B. Resistencia a flexión (Sin Ciclos de envejecimiento)

Para la realización de este ensayo se emplea el panel: PB-04

B. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN _ Datos Iniciales		
CÓDIGO DE PANEL	DATOS INICIALES (Tomados después de 7 días en ambiente laboratorio) 28/07/2014	
	Temperatura promedio del Laboratorio: 24,5°C	HR promedio del Laboratorio: 55,00%
	PESO	HR
	gr.	%
PB-04	2372,25	13,5

Preparación de las probetas

- Seguidamente del tiempo de curado, se mantienen la probeta durante 7 días en ambiente laboratorio.
- Posteriormente se acondiciona con 24 horas de inmersión en agua a temperatura ambiente (para categorías A y B; y espesores ≤ 20 mm).
- Corte de la probeta:
 - o Relación distancia entre apoyos/espesor nominal sea igual o superior a 15. Es decir, $260\text{mm}/10\text{mm}=20$

- o Relación distancia entre apoyos/ flecha en la rotura sea igual o superior a 20. Es decir $260/10\text{mm}=20$
- o Ancho = 5 veces el espesor nominal. Es decir, 50mm.
- o Largo = Distancia entre apoyos más 40 mm. Es decir, la longitud entre apoyos será 260mm.

- Se corta el panel en 5 muestras de acuerdo al patrón de la Imagen 75. Este patrón está pensado para que las muestras queden de 50 mm. de ancho luego del desgaste generado por el disco de corte. (La máquina empleada para el corte de las piezas es una Sierra de Corte Circular con Sistema de Enfriamiento por Agua).

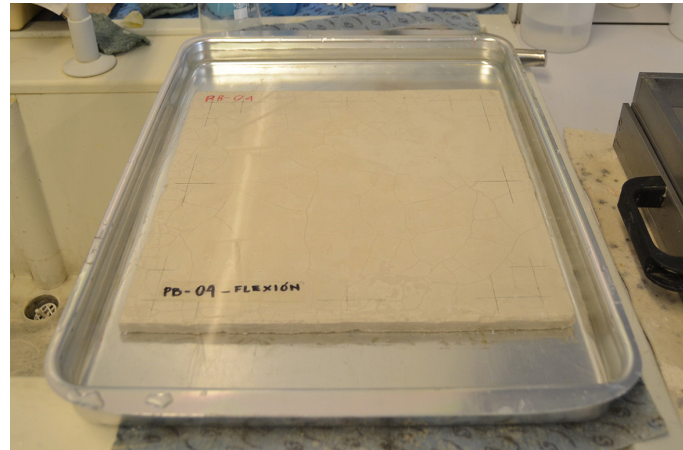
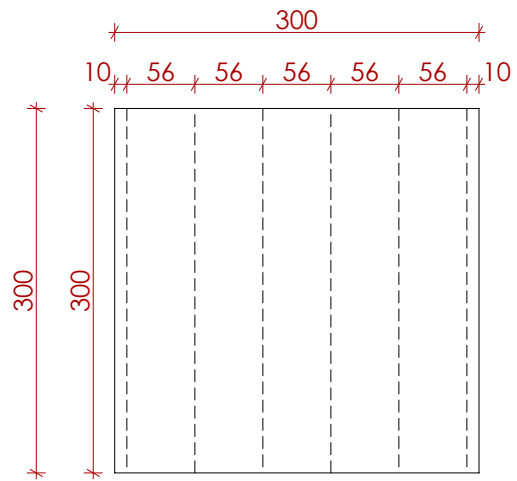
La normativa solicita ensayar los paneles en ambas direcciones, es decir, en su eje de fabricación y transversal. Esto no se considera en el ensayo, puesto que los paneles realizados en la campaña experimental carecen de dirección de fabricación.

- Denominación. Se asigna la letra B y un número de muestra, ejemplo:

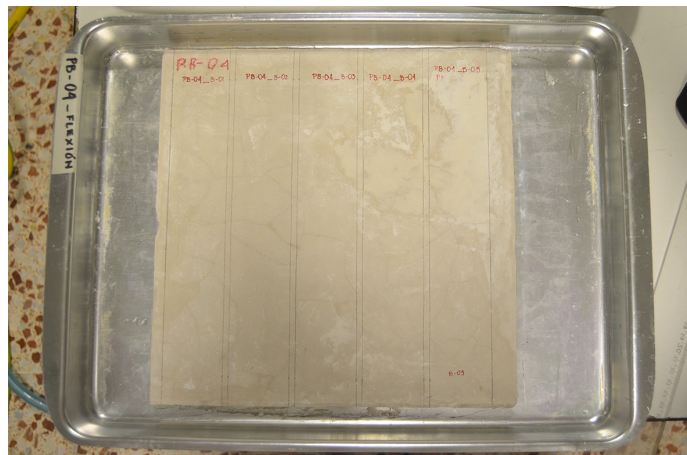
PB-04_B-01

Tabla 26 _ Peso y humedad relativa del panel PB-04. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



a. Inmersión del panel en agua a temperatura ambiente durante 24 horas previas al ensayo.



b. Se marca el panel, según el patrón de corte.



c. Se corta la probeta.

Imagen 75 _ Patrón de corte para ensayo de resistencia a flexión. (Fuente propia)

Imagen 76 _ Fotografía de las muestras. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

41 La Norma solicita que la “la rotura se produzca transcurridos entre 10 seg. y 30 seg del comienzo de la aplicación de la carga”. En base a esto se calcula la velocidad de carga, mediante el ensayo a un panel de “prueba”.

Procedimiento

- Se instala la célula pequeña a la prensa multi-ensayo y se la configura para tomar los datos con el Sistema Internacional, con registro cada 0,25 seg. y velocidad en posición⁴¹ de 10mm/min.
- Se mide los anchos de las muestras y los espesores en el

eje de aplicación de la carga. (Imagen 77)

- Se coloca la muestra en la ubicación correcta, se acerca lo más posible los rodillos de la prensa a la probeta y se aplica la carga por medio de la barra central.

B. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN _ Datos Iniciales								
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	DATOS (previo al ensayo de flexión)						
		(Tomados después de realizar el corte de las probetas, anteriormente sumergidas 24 horas en agua) 29/07/2014						
		Temperatura del Laboratorio: 23,9°C				HR del Laboratorio: 50,70%		
		BASE			ESPESORES			LUZ ENTRE APOYOS
A	B	MEDIA	E1	E2	MEDIA			
mm.			mm.			mm.		
PB-04	B-01	50,60	51,30	50,95	14,00	14,50	14,25	260,00
PB-04	B-02	49,00	50,40	49,70	14,00	13,95	13,98	260,00
PB-04	B-03	51,45	49,45	50,45	13,85	13,75	13,80	260,00
PB-04	B-04	48,55	50,15	49,35	13,70	14,20	13,95	260,00
PB-04	B-05	51,20	50,05	50,63	14,40	14,50	14,45	260,00

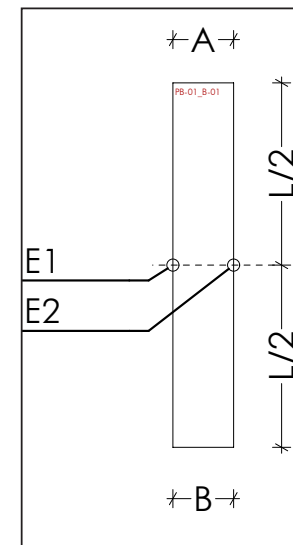
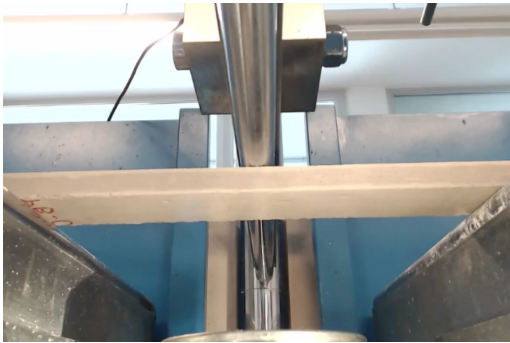


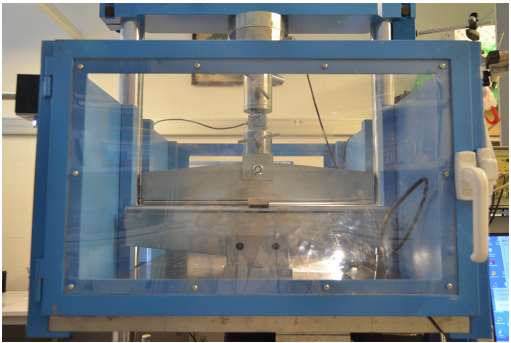
Tabla 27 _ Anchos y espesores de las muestras. (Fuente propia)

Imagen 77 _ Distancia entre apoyos. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



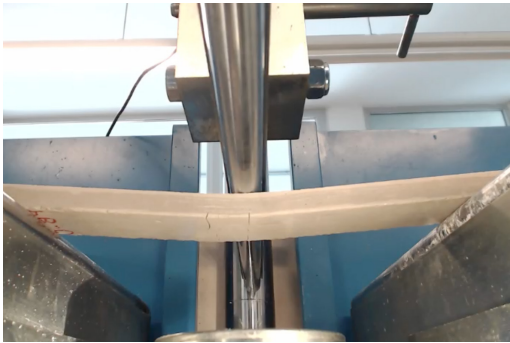
1. Inicio del Ensayo



a. Prensa multiensayo



d. Grieta de Rotura, fibras de refuerzo.



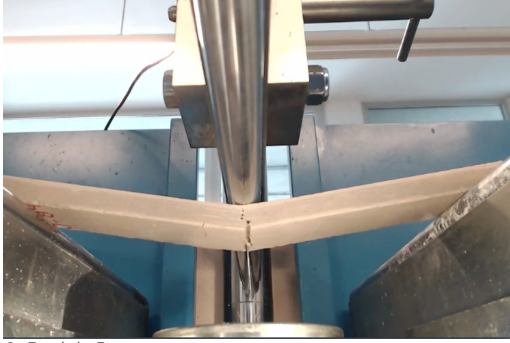
2. Primeras grietas durante el Ensayo



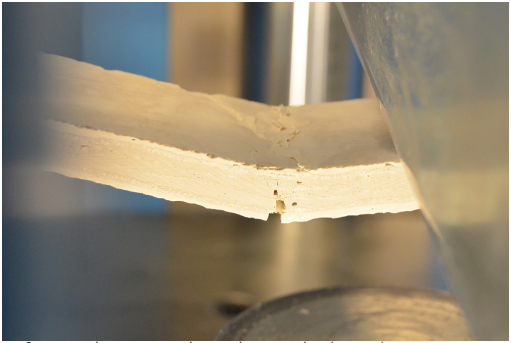
b. Realización del Ensayo



e. Grietas por deformación.



3. Final de Ensayo



c. Se retira la carga y el panel no se divide en dos partes

Imagen 78 _ Fotografías del Ensayo de Resistencia a Flexión. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Expresión e Interpretación de los resultados: Módulo de Rotura (MOR)

Según la fórmula,

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot l_s}{2 \cdot b \cdot e^2}$$

- MOR módulo de rotura (Megapascuales)
- F carga de rotura (Newtons)
- l_s distancia libre entre los ejes de apoyos (milímetros)
- b ancho de la muestra (milímetros)
- e espesor (milímetros)

Viene dada por la media aritmética de los resultados obtenidos en cada una de las muestras.

El MOR es tomado en tres puntos (Imagen 79):

- En el límite de proporcionalidad o primera grieta.

- Al 80% del límite de proporcionalidad. Para efectos de cálculo en una aplicación real del material, se considera un 20% menos del valor anterior que es cuando el panel ha empezado su rotura.
- El valor máximo.

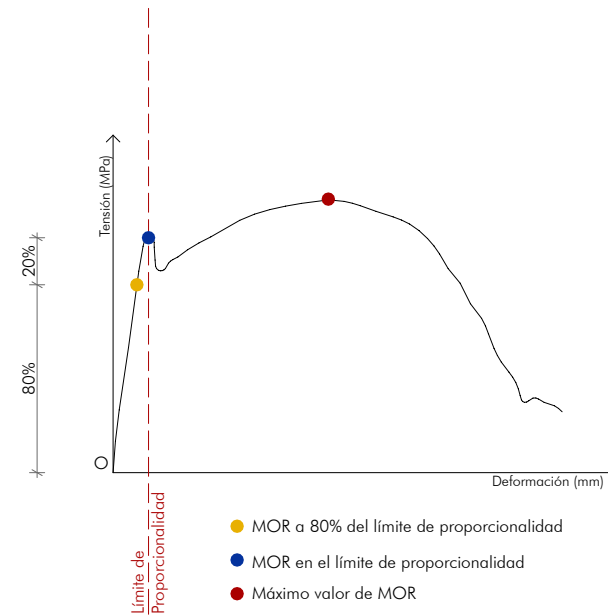
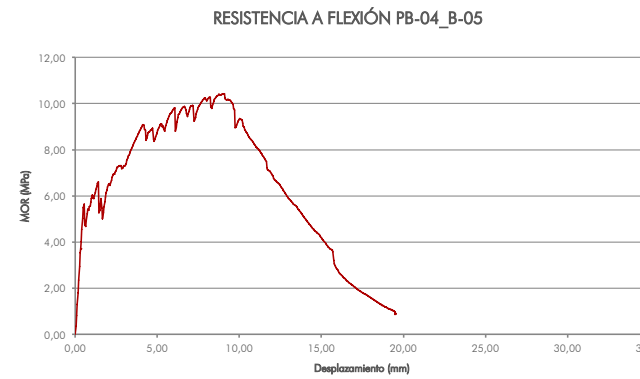
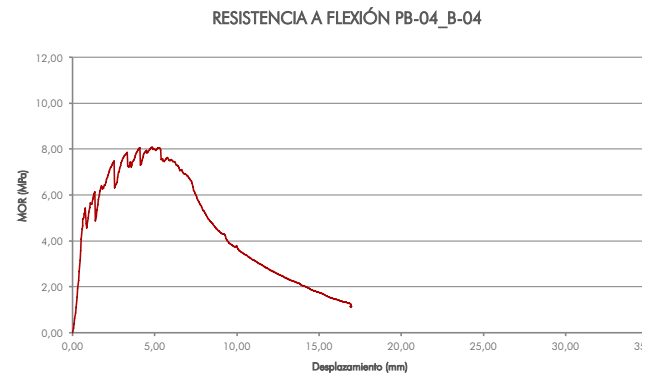
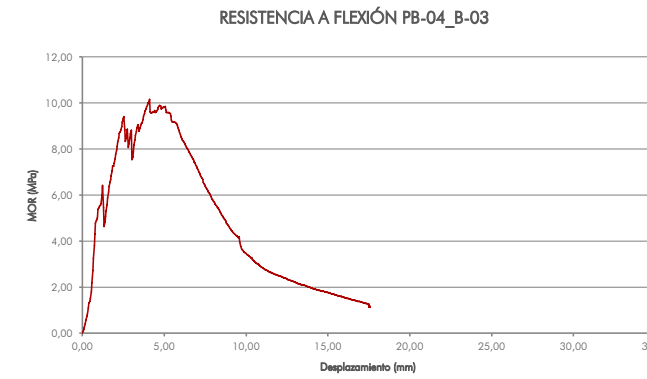
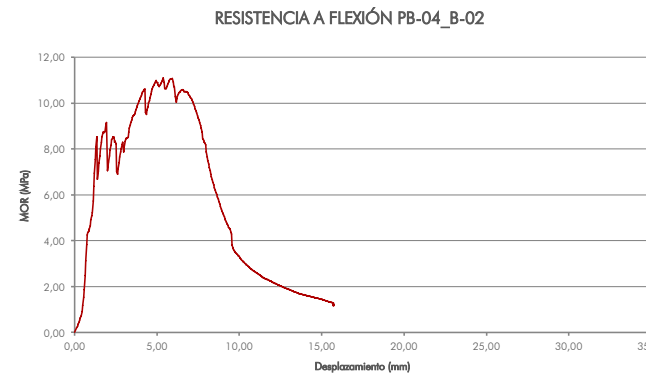
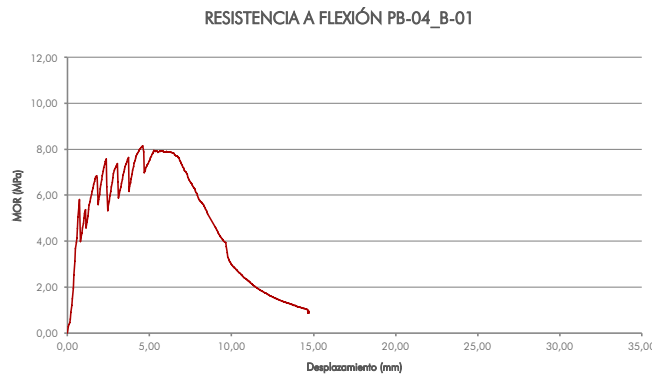


Imagen 79 _ Puntos donde se toma el valor de MOR. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 13 _ Curva de tenso-deformación PB-04_B-01. (Fuente Propia)

Gráfica 14 _ Curva de tenso-deformación PB-04_B-02. (Fuente Propia)

Gráfica 15 _ Curva de tenso-deformación PB-04_B-03. (Fuente Propia)

Gráfica 16 _ Curva de tenso-deformación PB-04_B-04. (Fuente Propia)

Gráfica 17 _ Curva de tenso-deformación PB-04_B-05. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Expresión e Interpretación de los resultados: Módulo de Elasticidad (MOE)

Según la fórmula,

$$MOE = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_s^3}{4 \cdot b \cdot e^3 \cdot (f_2 - f_1)}$$

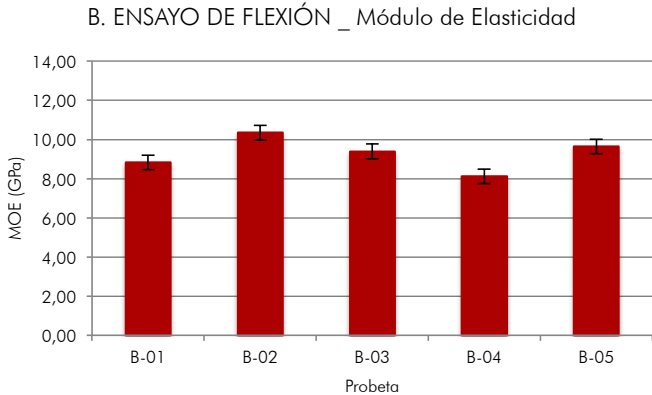
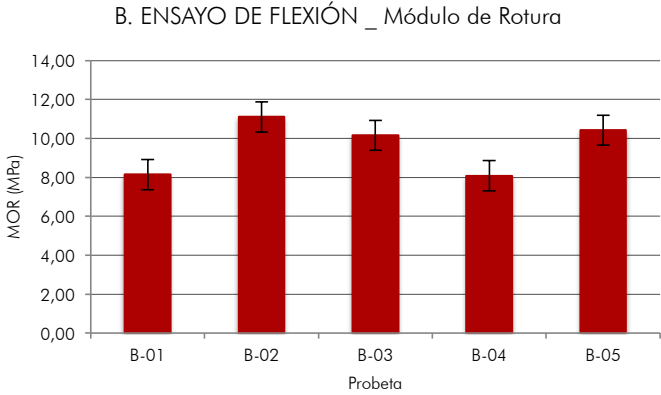
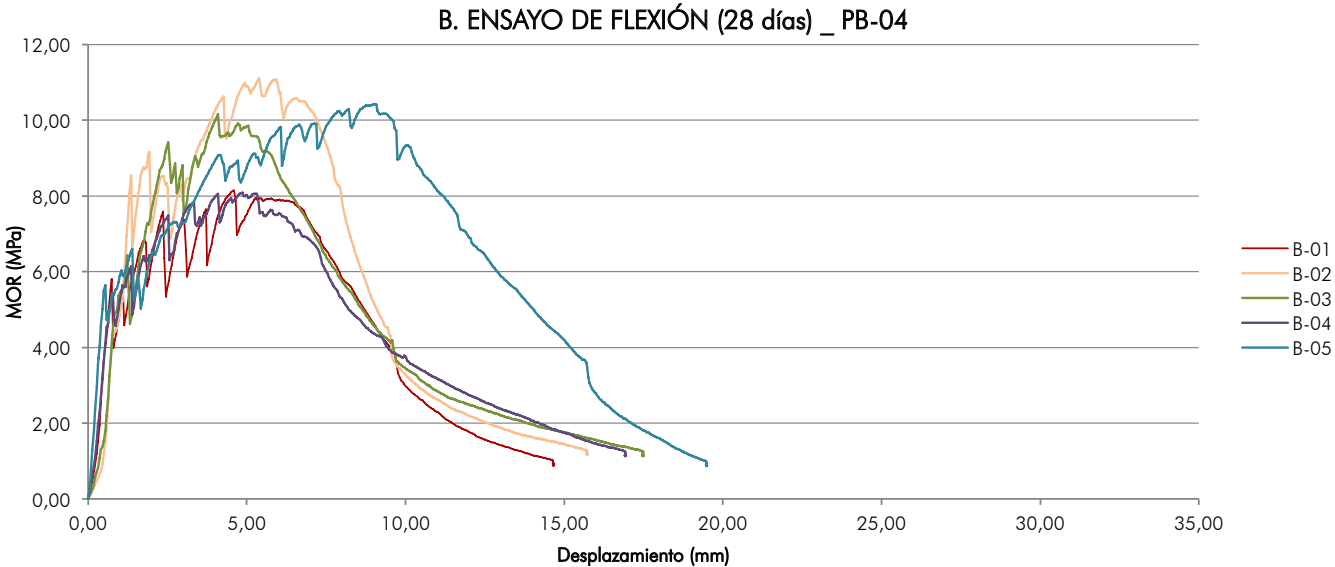
MOE módulo de elasticidad (Gigapascales o Megapascales)
 F2 y F1 cargas aplicadas en dos puntos dentro de la sección lineal del plano, por debajo del límite de proporcionalidad (Newtons)
 l_s distancia libre entre los ejes de apoyos (milímetros)
 b ancho de la muestra (milímetros)
 e espesor (milímetros)
 f1 y f2 deformaciones correspondientes a las cargas seleccionadas (milímetros)

Resultados

B. ENSAYO DE FLEXIÓN _ Resultados							
Temperatural Laboratorio: 24°C				HR del Laboratorio: 55,00%			
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	EDAD	CICLOS	MOR			MOE
				80%	1º GRIETA	MÁX.	GPa.
				Mpa	Mpa	Mpa	
PB-04	B-01	28 días	Sin ciclos	4,55	5,81	8,14	8,83
PB-04	B-02	28 días	Sin ciclos	6,93	8,54	11,10	10,35
PB-04	B-03	28 días	Sin ciclos	5,02	6,42	10,16	9,39
PB-04	B-04	28 días	Sin ciclos	4,52	5,43	8,08	8,13
PB-04	B-05	28 días	Sin ciclos	4,55	5,64	10,42	9,65
MEDIA:				5,12	6,37	9,58	9,27

Tabla 28 _ Tabla de resultados del MOR y MOE. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 18 _ Comparativo de curvas de Tenso-deformación. (Fuente Propia)
 Gráfica 19 _ Comparativo del MOR (Fuente Propia)
 Gráfica 20 _ Comparativo del MOE(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.5.1. Energía (Sin Ciclos de envejecimiento)

Según la fórmula,

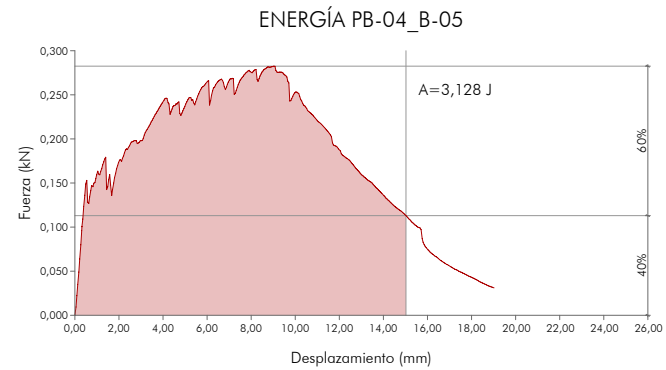
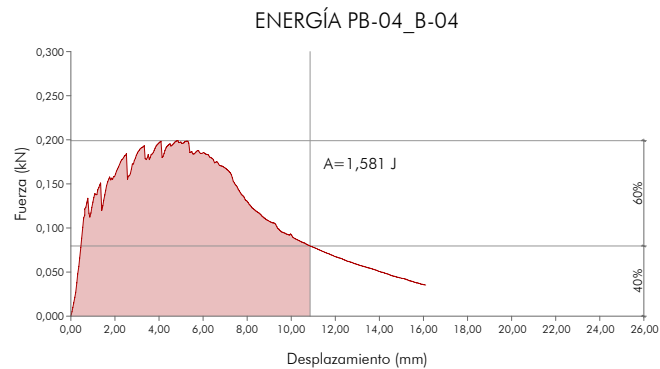
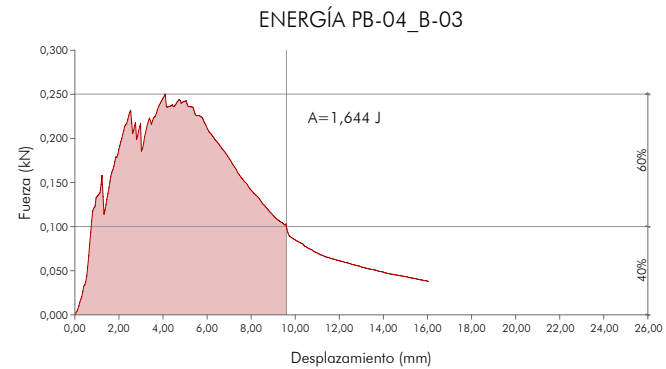
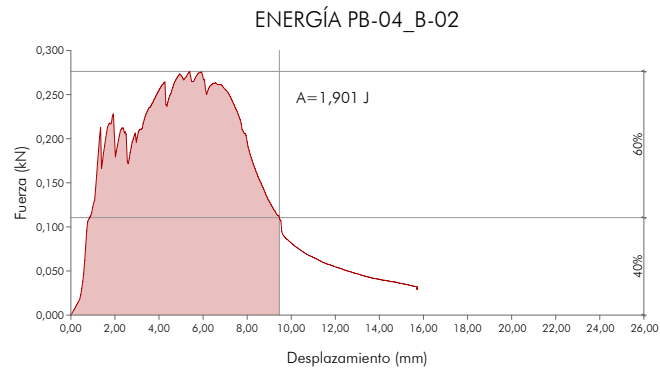
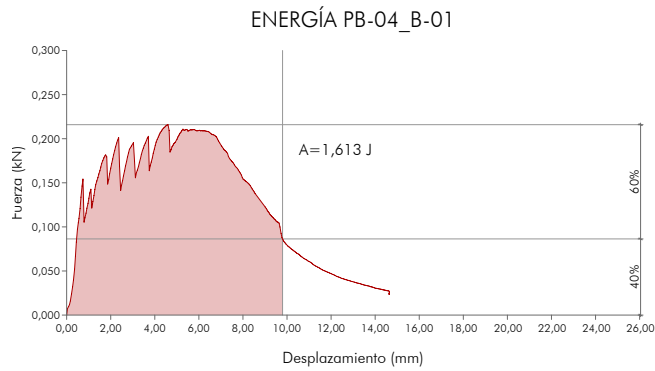
$$E = \frac{A}{b \cdot e}$$

- E* Energía (kilojulios/metros cuadrados)
- A* Área (Kilojulios)
- b* base (metros)
- h* espesor (metros)

ENERGÍA_PANEL BLANCO (Sin Ciclos)					
FÓRMULA	$E = \frac{A}{b \cdot h}$		EDAD: 28 días		CICLOS: Sin ciclos
CÓDIGO DEL PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	ÁREA (kJ)	BASE (m)	ESPESOR (m)	ENERGÍA (kJ/m ²)
PB-04	B-01	0,001613	0,050950	0,014250	2,22
PB-04	B-02	0,001901	0,049700	0,013975	2,74
PB-04	B-03	0,001644	0,050450	0,013800	2,36
PB-04	B-04	0,001581	0,049350	0,013950	2,30
PB-04	B-05	0,003128	0,050625	0,014450	4,28
MEDIA DE ENERGÍA:					2,78

Tabla 29_ Energía del Panel PB-04 a 28 días

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 21 _ Energía PB-04_B-01. (Fuente Propia)
 Gráfica 22 _ Energía PB-04_B-02. (Fuente Propia)
 Gráfica 23 _ Energía PB-04_B-03. (Fuente Propia)
 Gráfica 24 _ Energía PB-04_B-04. (Fuente Propia)
 Gráfica 25 _ Energía PB-04_B-05. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

124

5.3.6. C. Variación dimensional

Generalidades

Para la realización de este ensayo se emplea los paneles: PB-05 y PB-06

Se mide la variación dimensional debida a la humedad relativa del ambiente con una temperatura estable.

Preparación de la Probetas

- Se cortan las probetas, de manera que sus cuatro lados queden rectos y lisos, para tomar las medidas lo más exactas posibles. (Imagen 80) Se obtienen 4 muestras.
- Se denominan con la letra C:

PB-05_C-01

PB-05_C-02

PB-06_C-03

PB-06_C-04

- Se registran las medidas iniciales de las muestras, tomadas a 10mm. de sus bordes, como indica la Imagen 82. Se utiliza una regla con precisión de 1mm. para la longitud y un pie de rey con precisión de 0,05mm. para el espesor.

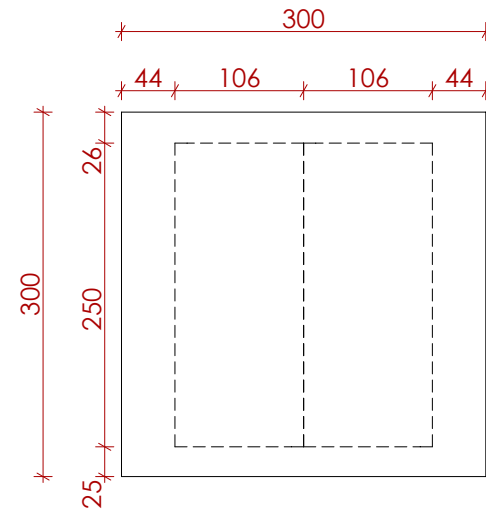


Imagen 80 _ Patrón de Corte. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

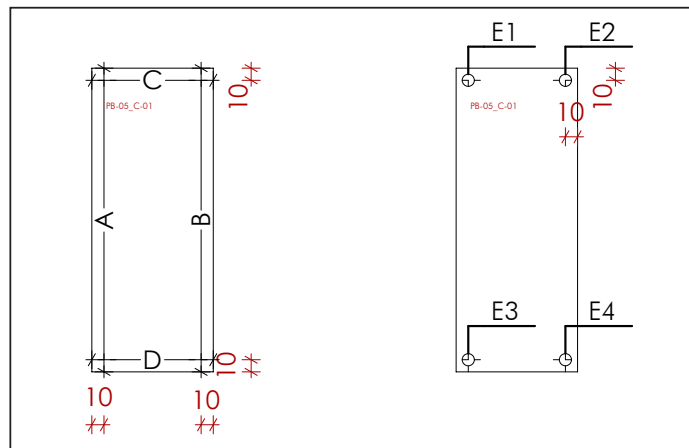
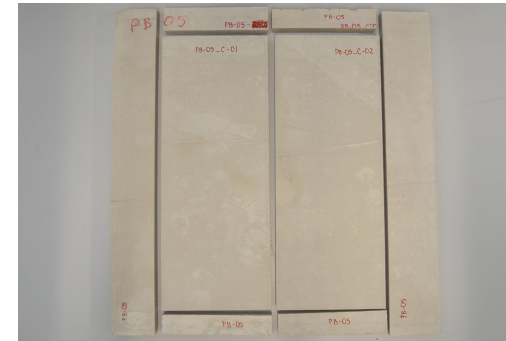
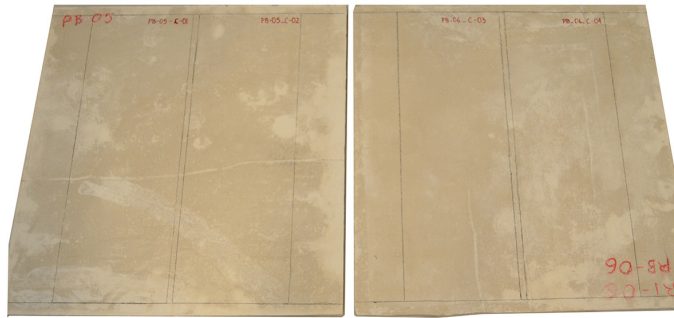


Imagen 82 _ Guía para tomar las medidas.
(Fuente Propia)

Tabla 30 _ Datos iniciales de las probetas.
(Fuente Propia)

C. ENSAYO DE VARIACIÓN DIMENSIONAL_Datos Iniciales											
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	DATOS INICIALES									
		(Tomados después de realizar el corte de las probetas) 28/07/2014 19:40									
		Temperatura del Laboratorio: 23,9°C		HR del Laboratorio: 50,90%							
		PESO	HR	DIMENSIONES				ESPESORES			
gr.	%	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4		
		mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	
PB-05	C-01	630,60	17,10	251,00	251,00	98,95	99,00	13,15	13,30	13,20	13,30
PB-05	C-02	640,40	17,00	252,00	252,00	99,10	99,05	13,20	13,15	13,15	13,15
PB-06	C-03	613,40	17,40	249,00	249,00	99,00	98,90	13,50	12,70	13,50	12,90
PB-06	C-04	645,50	17,50	252,00	251,00	99,15	99,05	13,15	13,60	12,90	13,90

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



b. Corte de los paneles



c. Bombona de secado. Se comprueba la humedad relativa en el interior.



d. Bombona de secado. Se comprueba la humedad relativa en el interior.



e. Ensayo de estado Seco



f. Ensayo de estado Seco

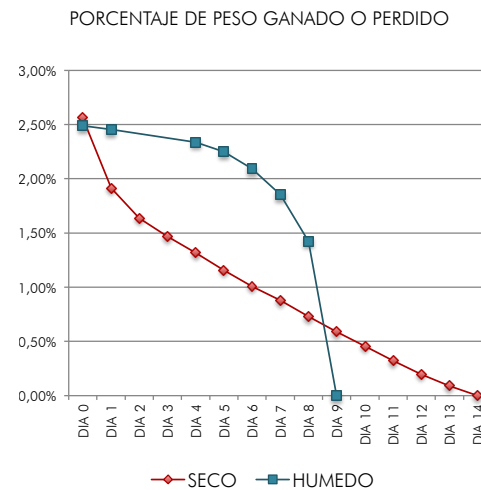
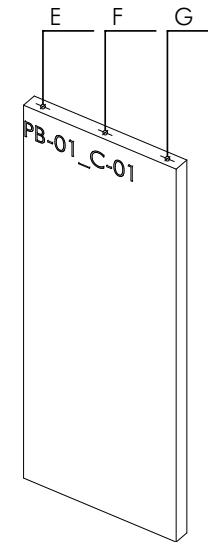
Imagen 81 _ Fotografías de las probetas.
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Procedimiento

- Se acondicionan las probetas con una humedad relativa del $(30 \pm 2) \%$ y una temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Para ello fue necesario una cámara de refrigeración (Cámara No. 4 de la ESAB) acondicionada a $23 ^\circ\text{C}$, dentro de la cual se colocó una bombona de secado con una solución saturada de Cloruro de Magnesio en su interior. Según la ASTM en su publicación "Práctica estándar para mantener humedades relativas constantes por medio de soluciones acuosas"[62] la solución saturada de Cloruro de Magnesio a una temperatura de 23°C da una HR del 30% aproximadamente. Esto se comprueba luego de 3 horas de cerrar la bombona, gracias a la utilización de un higrómetro. Posteriormente se colocan las muestras, separadas entre ellas y se cierra la bombona herméticamente.
- Se pesa las muestras cada 24 horas hasta llegar a un peso constante⁴². Las probetas tardan 14 días en estabilizarse.
- Nuevamente se toma las mediciones siguiendo el mismo procedimiento anterior.

- Adicionalmente, se utiliza dos extensores con precisión de 0,001mm. para medir la variación de longitud y espesor. Los extensores fueron fijados en el laboratorio y mantenidos intactamente durante todo el ensayo. La longitud es tomada en 3 puntos de cada muestra, mientras que el espesor es tomado en 4 puntos. (Imagen 83)



Gráfica 26 _ Porcentaje de ganancia o pérdida de peso de las muestras.

⁴² Peso constante, es cuya ganancia o pérdida de peso en un periodo de 24 horas no exceda el 0,1% del peso de la probeta.

Imagen 83 _ Guía para tomar las medidas. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

128

- Luego se procede con el ciclo húmedo. Las muestras se acondicionan con una humedad relativa de $(90 \pm 2) \%$ y una temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Para ello se introduce las probetas en el armario de curado, regulando sus parámetros para cumplir con lo establecido.
- Se pesa las muestras nuevamente cada 24 horas hasta llegar a un peso constante. Las probetas tardan 9 días en estabilizarse.
- Se repite el procedimiento de medida, tanto con los medios convencionales (regla y pie de rey), como con los extensómetros.



Imagen 84 _ Fotografías del ensayo.
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Interpretación de los datos

Viene expresada por los porcentajes de longitud y espesor, mediante la siguiente fórmula,

$$L_m = \frac{(L_{90} - L_{30}) \cdot 100}{L_{30}} (\%) \quad E_m = \frac{(E_H - E_S) \cdot 100}{E_S} (\%)$$

L_{90} longitud de la muestra a una humedad relativa del 90%

L_{30} longitud de la muestra a una humedad relativa del 30%

Resultados

Los resultados tomados con los extensómetros, muestran una variación mínima y un comportamiento poco habitual en estos compuestos. (las mediciones totales están adjuntas en el Anexo 9.8).

Estos resultados muestran que después del acondicionamiento húmedo, las muestras crecen longitudinalmente pero disminuyen su espesor. Mientras que, luego del ciclo seco, se encogen en longitud y aumenta su espesor.

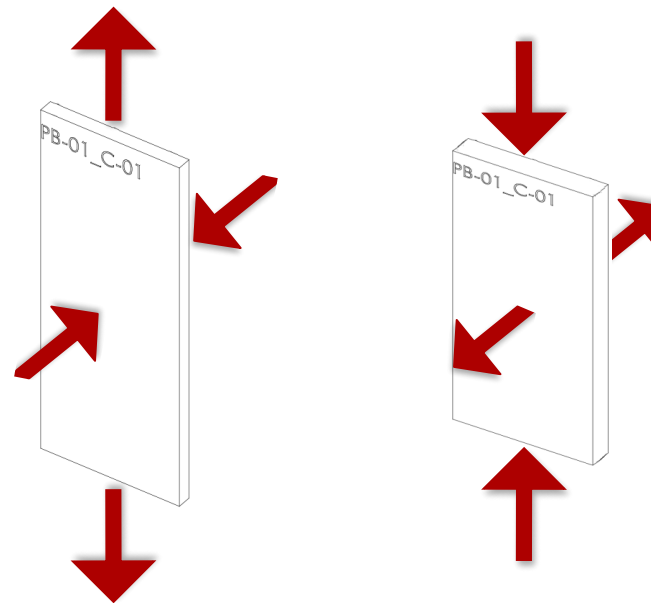


Imagen 85 _ Comportamiento de las muestras. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Esto puede estar dado por un comportamiento laminar que asumen el panel debido al método de fabricación a través de láminas de NW.

Por otro lado, a manera de profundizar la investigación, se decide meter las muestras a una estufa ventilada a 60°C durante 3 días y secar completamente los compuestos. La temperatura y el tiempo de secado están basadas en el estudio

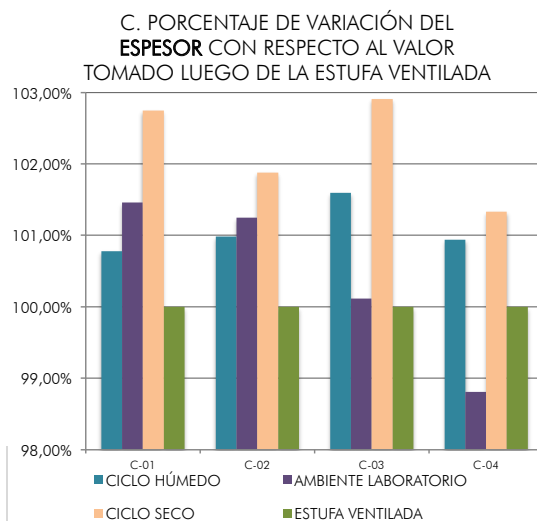
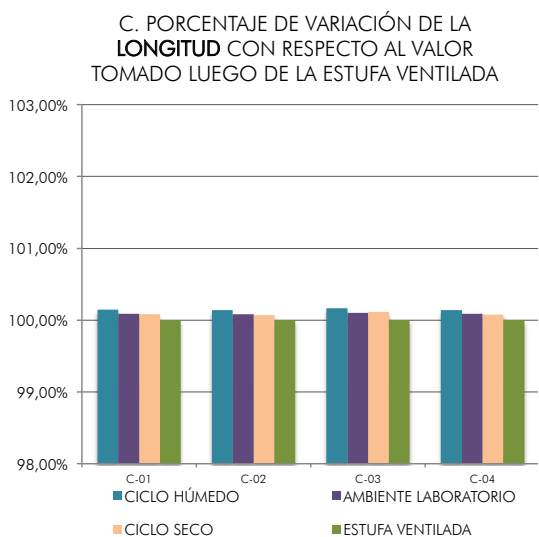
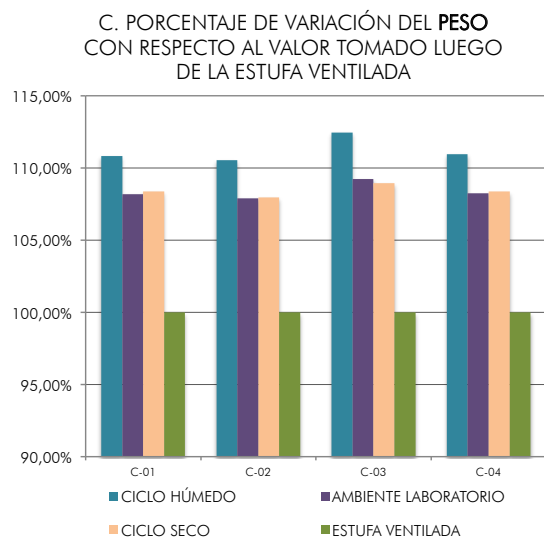
“The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites”[31].

Finalmente luego de este procedimiento, se toma nuevamente las mediciones y se aplica las formulas de interpretación de datos. Es decir, entre las medidas tomadas a un 90% de humedad relativa y aquellas registradas después del secado en estufa ventilada.

Tabla 31 _Resultados de la Variación Dimensional

C. ENSAYO DE VARIACIÓN DIMENSIONAL												
PROBETA		LONGITUD					ESPESOR					
		$L_m = \frac{(L_H - L_S) \cdot 100}{L_S} (\%)$					$E_m = \frac{(E_H - E_S) \cdot 100}{E_S} (\%)$					
		A	B	C	PROMEDIO PROBETA (%)	PROMEDIO LONGITUD (%)	E1	E2	E3	E4	PROMEDIO PROBETA (%)	PROMEDIO ESPESOR (%)
		%	%	%			%	%	%	%		
PB-05	C-01	0,140%	0,149%	0,157%	0,149%	0,148%	0,965%	0,913%	0,335%	0,911%	0,781%	1,075%
PB-05	C-02	0,140%	0,148%	0,136%	0,142%		0,893%	0,456%	1,617%	0,967%	0,983%	
PB-06	C-03	0,145%	0,167%	0,182%	0,165%		0,818%	1,452%	1,596%	2,512%	1,594%	
PB-06	C-04	0,146%	0,134%	0,136%	0,139%		1,381%	0,293%	1,062%	1,030%	0,941%	

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 27 _ Porcentaje de variación del peso tomando como referencia el valor luego de la estufa ventilada. (Fuente Propia)

Gráfica 28_ Porcentaje de variación de la longitud tomando como referencia el valor luego de la estufa ventilada. (Fuente Propia)

Gráfica 29 _ Porcentaje de variación del espesor tomando como referencia el valor luego de la estufa ventilada. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.7. D. Inmersión y Secado

Este ensayo pretende medir la durabilidad del compuesto, mediante un envejecimiento acelerado con ciclos seco-húmedos o Inmersión-secado.

La durabilidad se determina mediante la comparación entre el ensayo de resistencia mecánica a flexión sin ciclos y con ciclos, el cual no debe reducir a menos del 75%.

Para este ensayo se utiliza el panel: PB-03

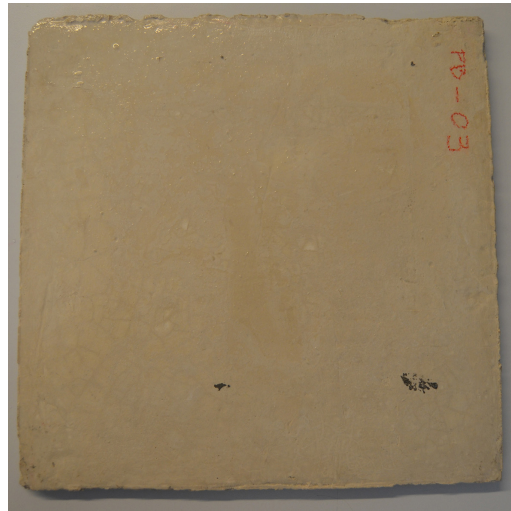
PB-03_D-01

Procedimiento

- Dados los objetivos planteados al inicio de la campaña experimenta según la Norma UNE EN 12467:2013, se desea lograr una categoría B. Para lo cual, la probeta debe ser sometida a 25 ciclos de Inmersión-secado:
 - o Inmersión: en agua a temperatura ambiente (superior a 5°C) durante 18 horas.
 - o Secado: en estufa ventilada a $(60 \pm 5)^\circ\text{C}$ durante 6 horas.

- Posteriormente, se mantiene la probeta durante 7 días en ambiente laboratorio y 24 horas de inmersión en agua a temperatura ambiente. Finalmente la probeta es preparada (cortada) y ensayada igual que el procedimiento anterior de Resistencia a Flexión.
- Las muestras cortadas se denominan con la letra D:

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



a. Panel con ciclos de Inmersión y Secado



b. Probeta rota a flexión con una burbuja por elaboración



c. Se observa poca cantidad de fibras y cortas.



d. Las fibras se muestran degradadas.

Imagen 86 _ Fotografías del Ensayo.
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

134

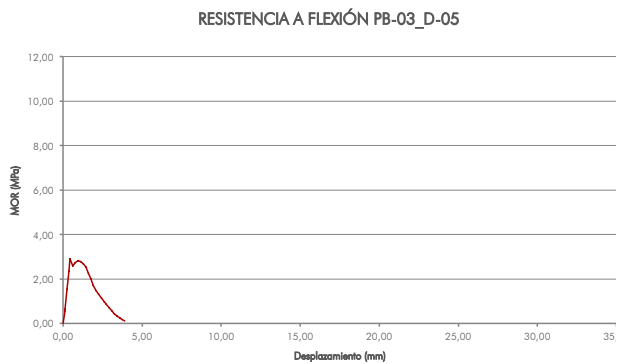
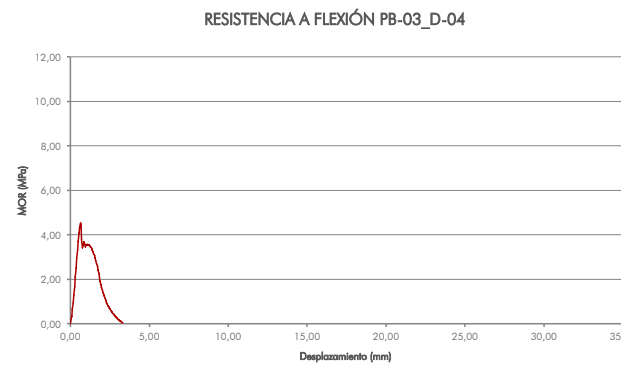
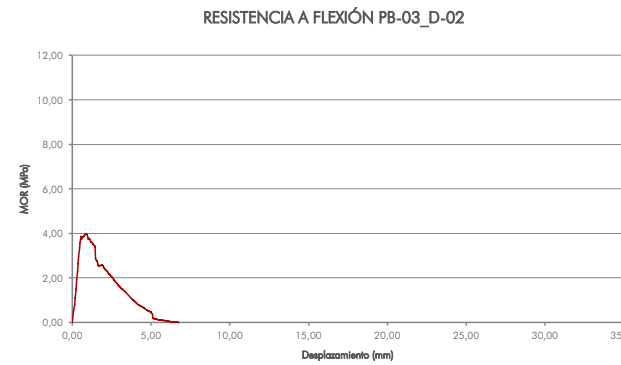
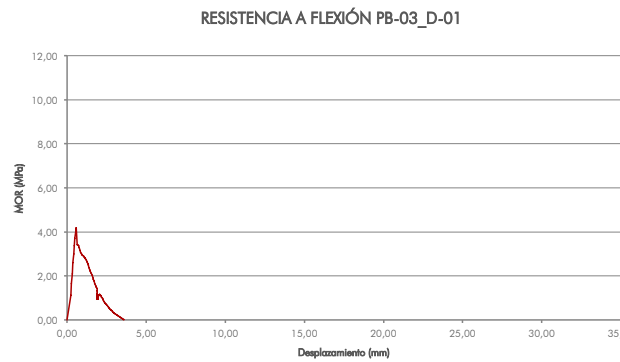
D. ENSAYO DE INMERSIÓN Y SECADO _ Datos Iniciales		
CÓDIGO DE PANEL	DATOS INICIALES (Tomados previos al ensayo a flexión) 04/09/2014	
	Temperatura promedio del Laboratorio: 24,8°C	HR promedio del Laboratorio: 46,50%
	PESO*	HR
	gr.	%
PB-03	2202,03	11,9

D. ENSAYO DE INMERSIÓN Y SECADO _ Datos Iniciales								
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	DATOS (previo al ensayo de flexión) (Tomados después de realizar el corte de las probetas, anteriormente sumergidas 24 horas en agua) 05/09/2014						
		Temperatura del Laboratorio: 25,1°C			HR del Laboratorio: 51,40%			
		BASE			ESPEORES			LUZ ENTRE APOYOS
		A	B	MEDIA	E1	E2	MEDIA	
		mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
PB-03	D-01	48,75	48,95	48,85	12,70	12,80	12,75	260,00
PB-03	D-02	49,20	47,25	48,23	13,85	12,55	13,20	260,00
PB-03	D-03	50,50	50,90	50,70	12,70	12,55	12,63	260,00
PB-03	D-04	51,65	50,10	50,88	12,60	12,75	12,68	260,00
PB-03	D-05	50,20	48,85	49,53	12,30	13,50	12,90	260,00

Tabla 32 _ Peso y humedad relativa del panel PB-03. (Fuente propia)

Tabla 33 _ Anchos y espesores de las muestras. (Fuente propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 30 _ Curva de tenso-deformación PB-03_D-01. (Fuente Propia)

Gráfica 31 _ Curva de tenso-deformación PB-03_D-02. (Fuente Propia)

Gráfica 32 _ Curva de tenso-deformación PB-03_D-03. (Fuente Propia)

Gráfica 33 _ Curva de tenso-deformación PB-03_D-04. (Fuente Propia)

Gráfica 34 _ Curva de tenso-deformación PB-03_D-05. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Observaciones durante los ciclos Inmersión-Secado

Al 3º ciclo, se observan grietas en la esquina superior izquierda, tanto en la cara frontal, como en el canto.

Al 4º ciclo, se desprende parte del mortero de la capa externa anteriormente agrietada.

En el 6º y 7º ciclos, se desprenden partes menores.

Luego de realizar el ensayo a flexión, se observó que la placa tenía burbujas de aire como falla de fabricación, tal vez estas influyen en los resultados pero no de manera significativa, la degradación de la fibra es la principal razón de esta disminución.

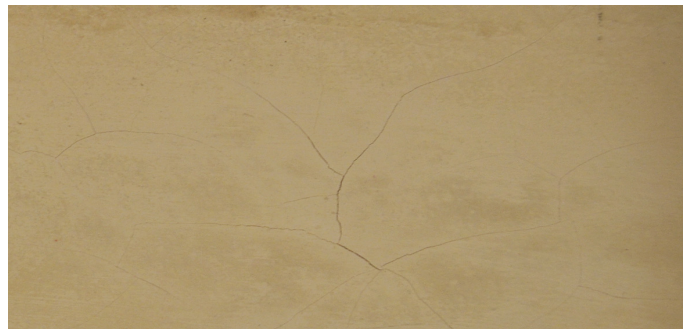


Imagen 87 _ Desprendimientos del mortero de la capa externa durante los ciclos de Inmersión-secado. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Resultados

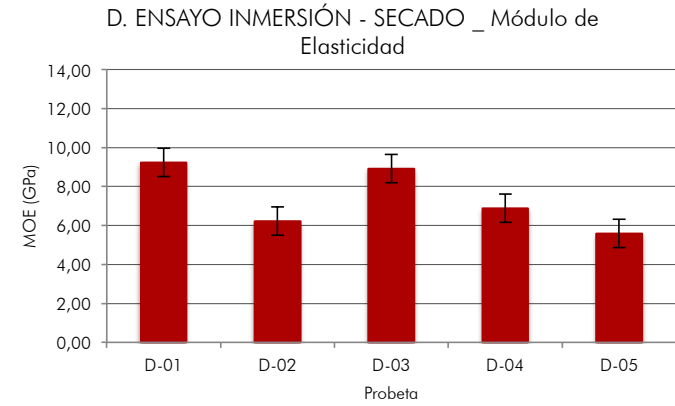
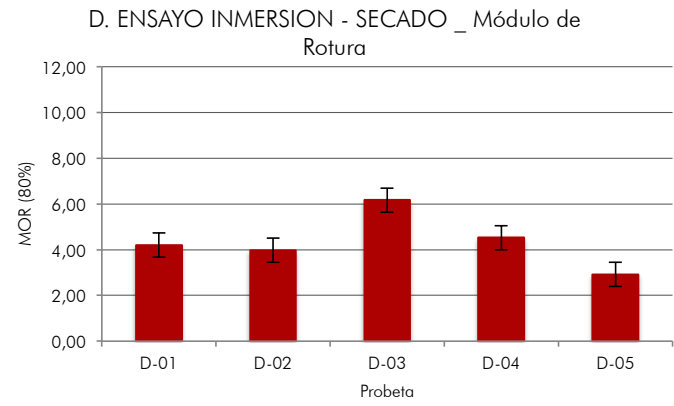
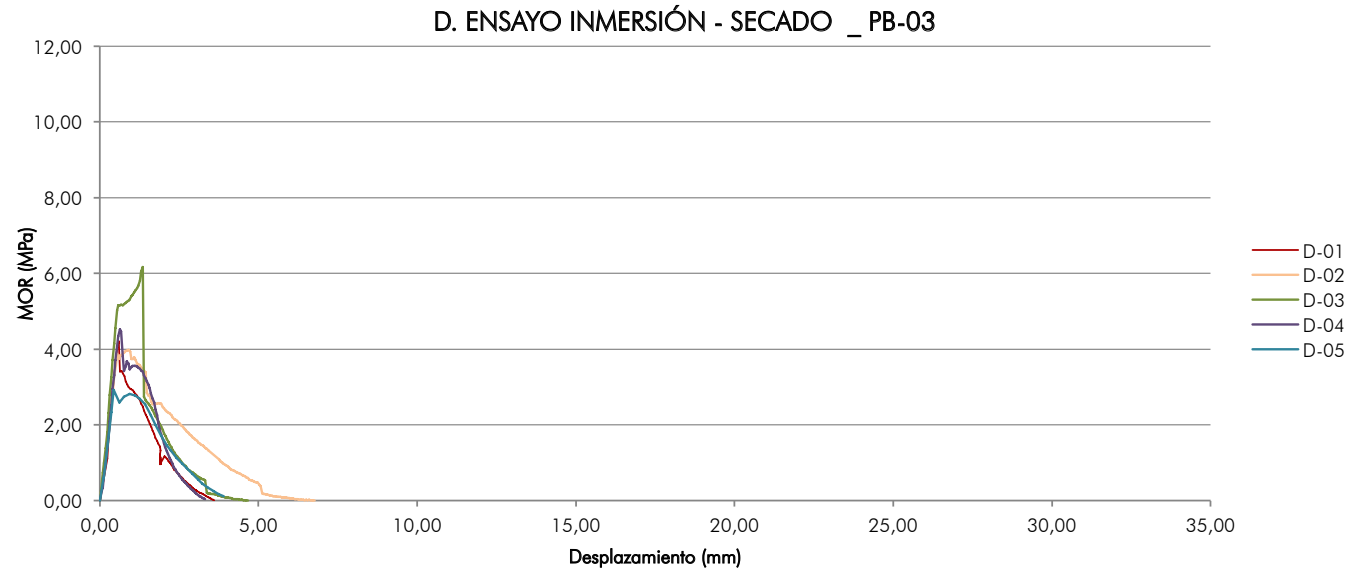
La comparación entre los ensayos de resistencia a flexión Con Ciclos y Sin Ciclos de envejecimiento, se realizará en las conclusiones junto con el envejecimiento natural. Sin embargo, a simple vista se puede observar como las curvas de Tenso-

deformación son notoriamente más pequeñas, al igual que los valores de MOR y MOE. Esto quiere decir que las fibras se han descompuesto y ya no aportan como refuerzo al compuesto.

Tabla 34 _ Tabla de resultados del MOR y MOE (Con ciclos de envejecimiento). (Fuente Propia)

D. ENSAYO INMERSIÓN Y SECADO							
Temp. Promedio del Laboratorio: 25,1°C				HR del Laboratorio: 51,40%			
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	EDAD	CICLOS	MOR			MOE
				80%	1º GRIETA	MÁX.	
				Mpa	Mpa	Mpa	
PB-03	D-01	74 días	25 ciclos	3,36	4,20	4,20	9,23
PB-03	D-02	74 días	25 ciclos	2,95	3,87	3,97	6,22
PB-03	D-03	74 días	25 ciclos	4,15	5,16	6,16	8,92
PB-03	D-04	74 días	25 ciclos	3,70	4,52	4,52	6,89
PB-03	D-05	74 días	25 ciclos	2,33	2,91	2,91	5,59
MEDIA:				3,30	4,13	4,35	7,37

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 35 _ Comparativo de curvas de Tenso-deformación. (Fuente Propia)
 Gráfica 36 _ Comparativo del MOR (Fuente Propia)
 Gráfica 37 _ Comparativo del MOE(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

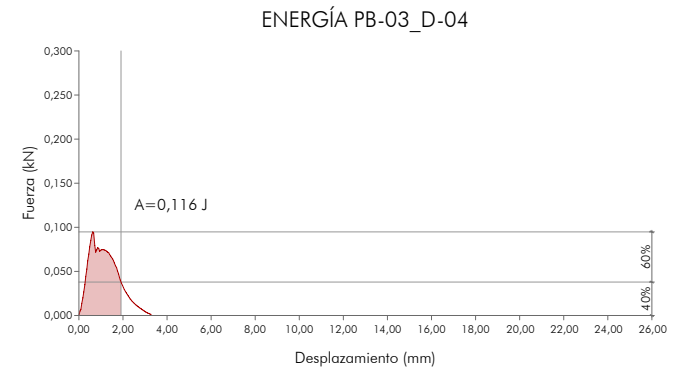
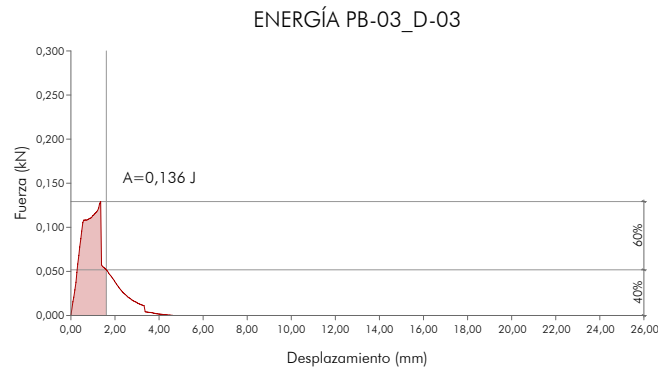
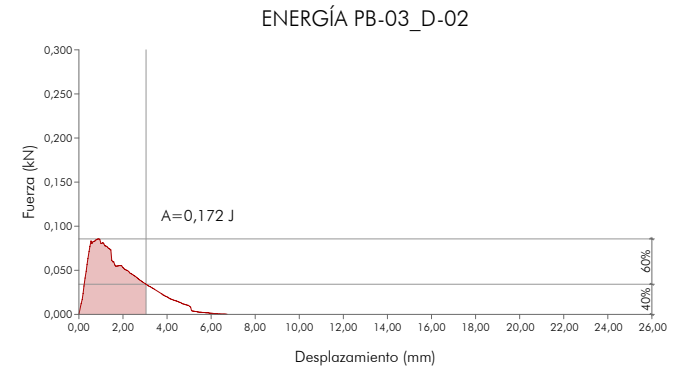
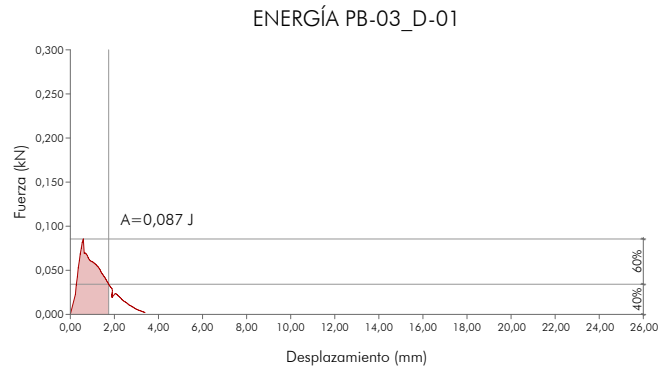
5.3.7.1. Energía (Con Ciclos de envejecimiento)

Al igual que los valores de MOR y MOE, la energía que puede absorber el compuesto se ve enormemente disminuida con respecto a la Energía de las muestras Sin Ciclos de envejecimiento.

ENERGÍA_PANEL BLANCO (Con 25 Ciclos Inmersión-Secado)					
FÓRMULA	$E = \frac{A}{b \cdot h}$		EDAD: 46 días	CICLOS: 25 ciclos Seco-Húmedo	
CÓDIGO DEL PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	ÁREA (kJ)	BASE (m)	ESPESOR (m)	ENERGÍA (kJ/m ²)
PB-03	D-01	0,000087	0,048850	0,012750	0,14
PB-03	D-02	0,000172	0,048225	0,013200	0,27
PB-03	D-03	0,000136	0,050700	0,012625	0,21
PB-03	D-04	0,000116	0,050875	0,012675	0,18
PB-03	D-05	0,000107	0,049525	0,012900	0,17
MEDIA DE ENERGÍA:					0,19

Tabla 35_ Energía del Panel PB-03 (Con Ciclos de envejecimiento).
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



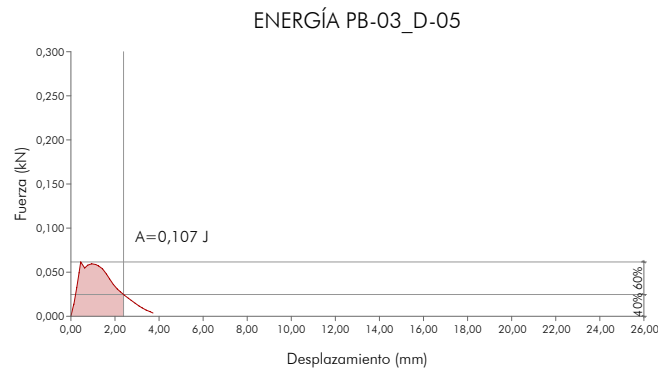
Gráfica 38 _ Energía PB-03_D-01. (Fuente Propia)

Gráfica 39 _ Energía PB-03_D-02. (Fuente Propia)

Gráfica 40 _ Energía PB-03_D-03. (Fuente Propia)

Gráfica 41 _ Energía PB-03_D-04. (Fuente Propia)

Gráfica 42 _ Energía PB-03_D-05. (Fuente Propia)



5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.8. E. Envejecimiento natural

Generalidades

El ensayo de envejecimiento natural fue llevado a cabo durante 60 días por el panel blanco (PB-01) y gris (PG) y 54 días por el panel amarillo (PA-07).

Los paneles fueron colocados a la intemperie en las afueras de los laboratorios de la ESAB en Castelldefels, entre el 1 de agosto y el 29 de septiembre del 2014, siguiendo la metodología antes descrita.

Al igual que el ensayo de Inmersión-secado, esta prueba pretende aportar con un dato más acerca de la durabilidad del compuesto y observar su comportamiento en un período de tiempo determinado.

Durante este tiempo también se podrá comprobar la eficacia y durabilidad del pigmento en uno de los paneles.

Los paneles fueron monitoreados diariamente, registrando la humedad relativa temperatura del material, y por otro lado la humedad relativa y temperatura del ambiente, durante el mes de agosto.



Imagen 88 _ Fotografías durante el envejecimiento natural. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

142

Observaciones

Durante el tiempo de envejecimiento el panel amarillo (PA-07) presentó ciertas fallas:

- El 1° día se observan pequeñas fisuras en la cara frontal del panel.
- El 3° día las grietas se vuelven más gruesas, lo mismo se observa en la cara posterior.
- El 5° día el panel tiene una disminución en la intensidad del color.
- Finalmente cuando se retira los paneles de la intemperie el panel amarillo presenta grietas más gruesas que los otros paneles, en especial una grieta importante en el canto superior.

El panel blanco (PB-01) tiene fisuras mínimas, mientras que el panel gris (PG) no muestra grietas.



Imagen 89 _ Fotografías de las grietas del panel. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.8.1. E.1 Resistencia a flexión

Preparación de las probetas

- Luego del tiempo establecido, los paneles son mantenidos durante 7 días en ambiente laboratorio y 24 horas de inmersión en agua a temperatura ambiente.
- Las probetas son cortadas y marcadas con la letra E:

PB-01_E-01

Procedimiento

Se procede siguiendo los mismos parámetros de los ensayos de resistencia a flexión anteriores.



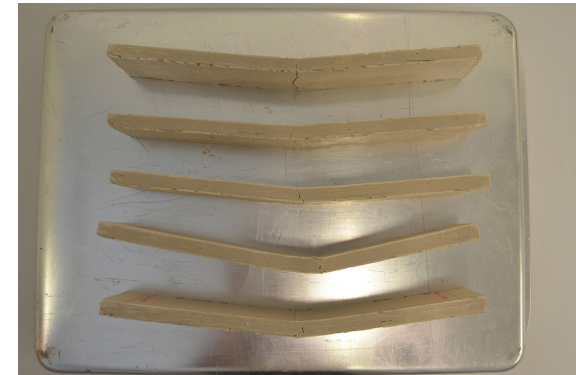
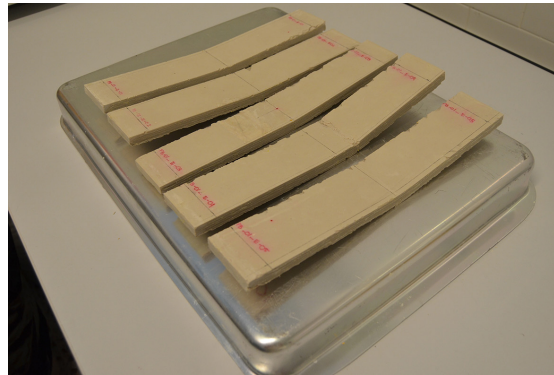
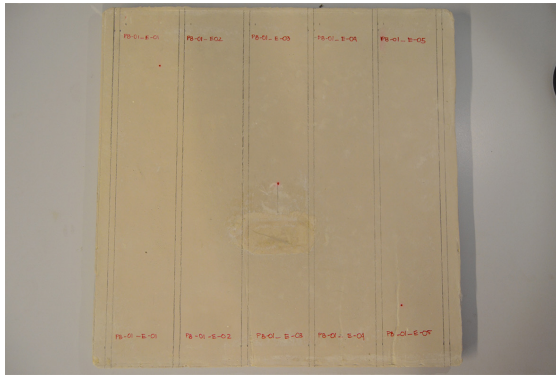
Imagen 90 _ Fotografías del Ensayo (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Tabla 36 _ Peso y humedad relativa del panel PB-01. (Fuente propia)

Tabla 37 _ Anchos y espesores de las muestras. (Fuente propia)

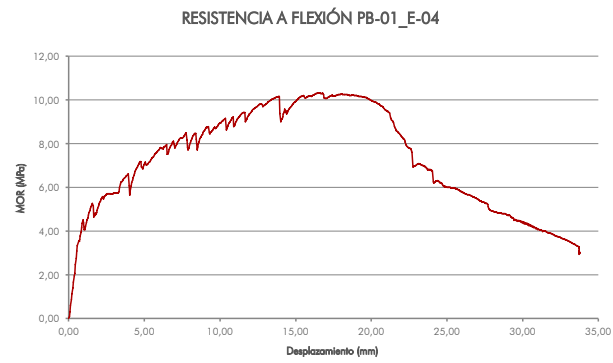
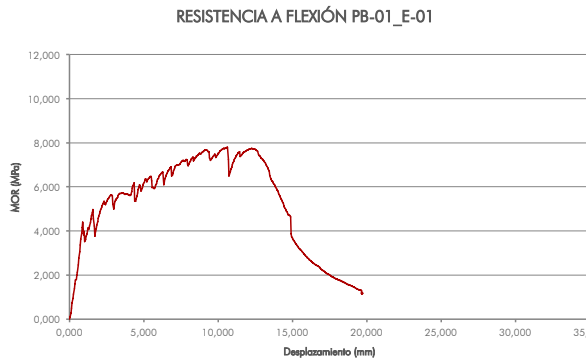
PANEL BLANCO



E. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN _ Datos Iniciales (PB-01)

CÓDIGO DE PANEL	DATOS INICIALES (Tomados después de 7 días en ambiente laboratorio) 28/07/2014		CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	DATOS (previo al ensayo de flexión) (Tomados después de realizar el corte de las probetas, anteriormente sumergidas 24 horas en agua) 29/07/2014						
	Temperatura Laboratorio: 22,3°C HR promedio del Laboratorio: 54,30%				Temperatura del Laboratorio: 22°C HR del Laboratorio: 49,80%						
	PESO	HR			BASE			ESPESORES			LUZ ENTRE APOYOS
	gr.	%			A	B	MEDIA	E1	E2	MEDIA	
					mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	
PB-01	2074,3	10,57	PB-01	E-01	52,65	52,10	52,38	11,75	11,80	11,78	260,00
			PB-01	E-02	51,80	51,10	51,45	11,60	11,60	11,60	260,00
			PB-01	E-03	48,00	49,00	48,50	11,60	11,65	11,63	260,00
			PB-01	E-04	51,00	50,40	50,70	11,80	12,10	11,95	260,00
			PB-01	E-05	51,80	52,40	52,10	12,30	12,40	12,35	260,00

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 43 _ Curva de tenso-deformación PB-01_E-01. (Fuente Propia)

Gráfica 44 _ Curva de tenso-deformación PB-01_E-02. (Fuente Propia)

Gráfica 45 _ Curva de tenso-deformación PB-01_E-03. (Fuente Propia)

Gráfica 46 _ Curva de tenso-deformación PB-01_E-04. (Fuente Propia)

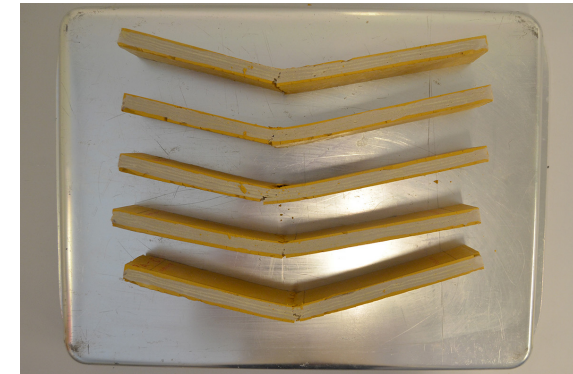
Gráfica 47 _ Curva de tenso-deformación PB-01_E-05. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Tabla 38 _ Peso y humedad relativa del panel PA-07. (Fuente propia)

Tabla 39 _ Anchos y espesores de las muestras. (Fuente propia)

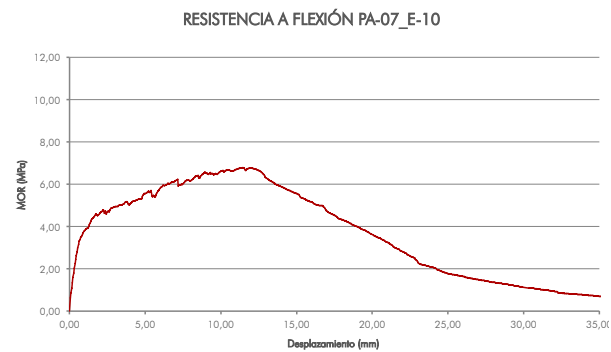
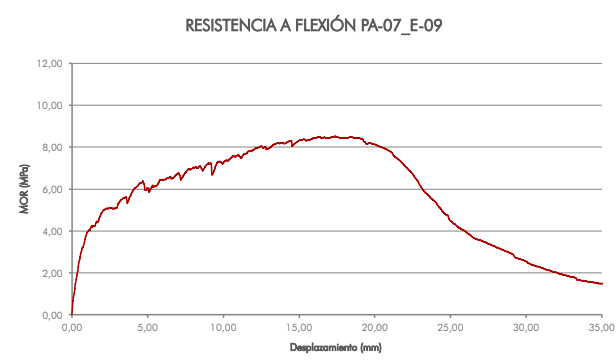
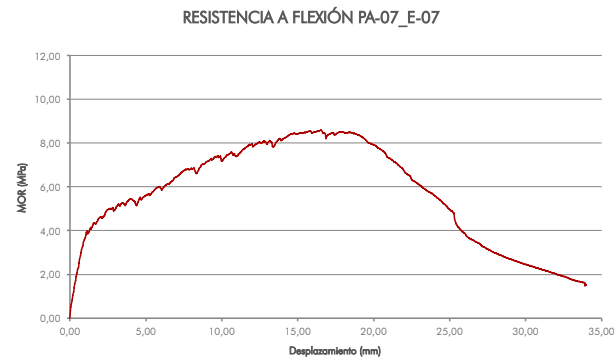
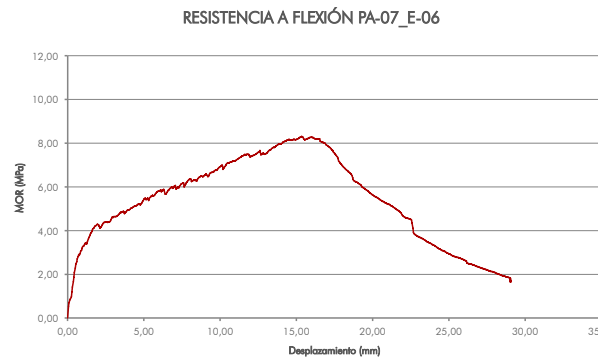
PANEL AMARILLO



E. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN _ Datos Iniciales (PA-07)

CÓDIGO DE PANEL	DATOS INICIALES (Tomados después de 7 días en ambiente laboratorio) 28/07/2014		CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	DATOS (previo al ensayo de flexión) (Tomados después de realizar el corte de las probetas, anteriormente sumergidas 24 horas en agua) 29/07/2014						
	Temperatura Laboratorio: 22,3°C	HR promedio del Laboratorio: 54,30%			Temperatura del Laboratorio: 22°C			HR del Laboratorio: 49,80%			
	PESO	HR			BASE			ESPEORES			LUZ ENTRE APOYOS
gr.	%	A	B	MEDIA	E1	E2	MEDIA				
					mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.
PA-07	2275,05	13,00	PA-07	E-06	51,15	50,40	50,78	13,80	13,35	13,58	260,00
			PA-07	E-07	50,00	53,50	51,75	13,30	12,85	13,08	260,00
			PA-07	E-08	52,00	48,70	50,35	13,05	12,70	12,88	260,00
			PA-07	E-09	51,20	50,90	51,05	12,75	12,95	12,85	260,00
			PA-07	E-10	50,00	48,45	49,23	13,15	13,00	13,08	260,00

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 48 _ Curva de tenso-deformación PA-07_E-06. (Fuente Propia)

Gráfica 49 _ Curva de tenso-deformación PA-07_E-07. (Fuente Propia)

Gráfica 50 _ Curva de tenso-deformación PA-07_E-08. (Fuente Propia)

Gráfica 51 _ Curva de tenso-deformación PA-07_E-09. (Fuente Propia)

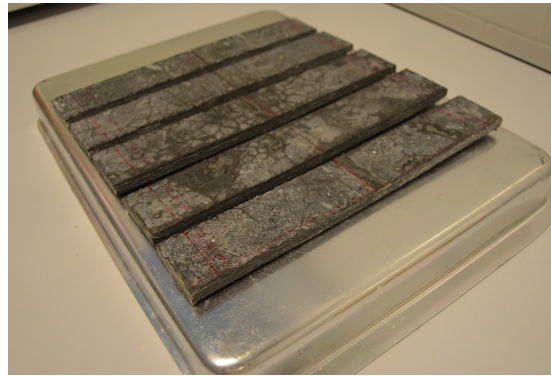
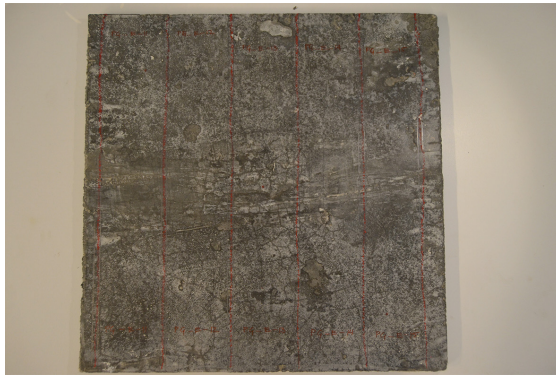
Gráfica 52 _ Curva de tenso-deformación PA-01_E-10. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Tabla 40 _ Peso y humedad relativa del panel PG. (Fuente propia)

Tabla 41 _ Anchos y espesores de las muestras. (Fuente propia)

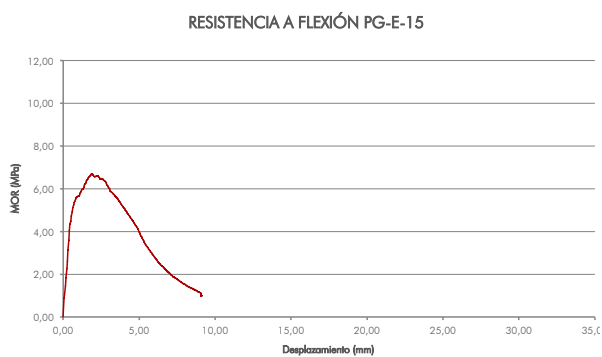
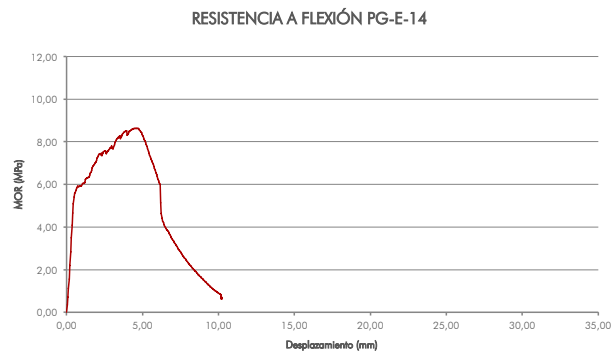
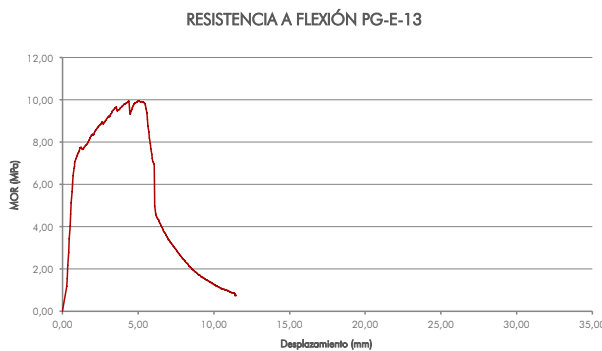
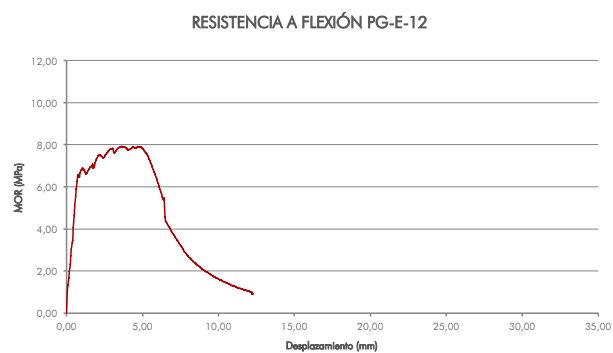
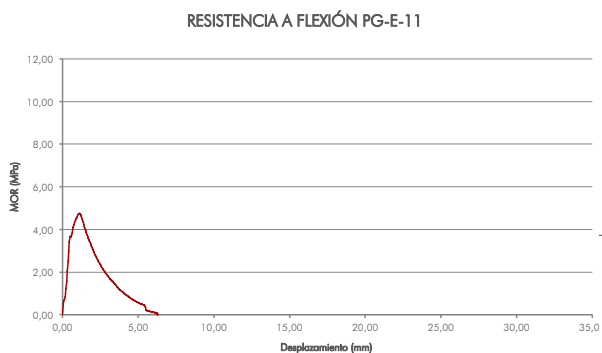
PANEL GRIS



E. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN _ Datos Iniciales (PG)

CÓDIGO DE PANEL	DATOS INICIALES (Tomados después de 7 días en ambiente laboratorio) 28/07/2014		CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	DATOS (previo al ensayo de flexión) (Tomados después de realizar el corte de las probetas, anteriormente sumergidas 24 horas en agua) 29/07/2014						
	Temperatura Laboratorio: 22,3°C HR promedio del Laboratorio: 54,30%				Temperatura del Laboratorio: 22°C		HR del Laboratorio: 49,80%			LUZ ENTRE APOYOS	
	PESO	HR			BASE			ESPEORES			
gr.	%	A	B	MEDIA	E1	E2	MEDIA	mm.			
		mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.			
PG	1896,25	16,10	PG	E-11	48,70	47,90	48,30	11,30	11,00	11,15	260,00
			PG	E-12	51,30	51,30	51,30	11,40	10,90	11,15	260,00
			PG	E-13	51,40	51,70	51,55	10,90	11,00	10,95	260,00
			PG	E-14	52,95	51,10	52,03	11,15	11,15	11,15	260,00
			PG	E-15	48,15	50,50	49,33	11,00	10,90	10,95	260,00

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 53 _ Curva de tenso-deformación PG_E-11. (Fuente Propia)

Gráfica 54 _ Curva de tenso-deformación PG_E-12. (Fuente Propia)

Gráfica 55 _ Curva de tenso-deformación PG_E-13. (Fuente Propia)

Gráfica 56 _ Curva de tenso-deformación PG_E-14. (Fuente Propia)

Gráfica 57 _ Curva de tenso-deformación PG_E-15. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Resultados

A diferencia del ensayo de Inmersión-secado, los resultados de esta prueba se observan mucho mejores. Aunque el valor del MOR en el límite de proporcionalidad es menor, el trabajo

de la fibra llega a ser mayor que en todos los otros ensayos. Esto quiere decir que la fibra aún mantiene sus propiedades y refuerza el compuesto.

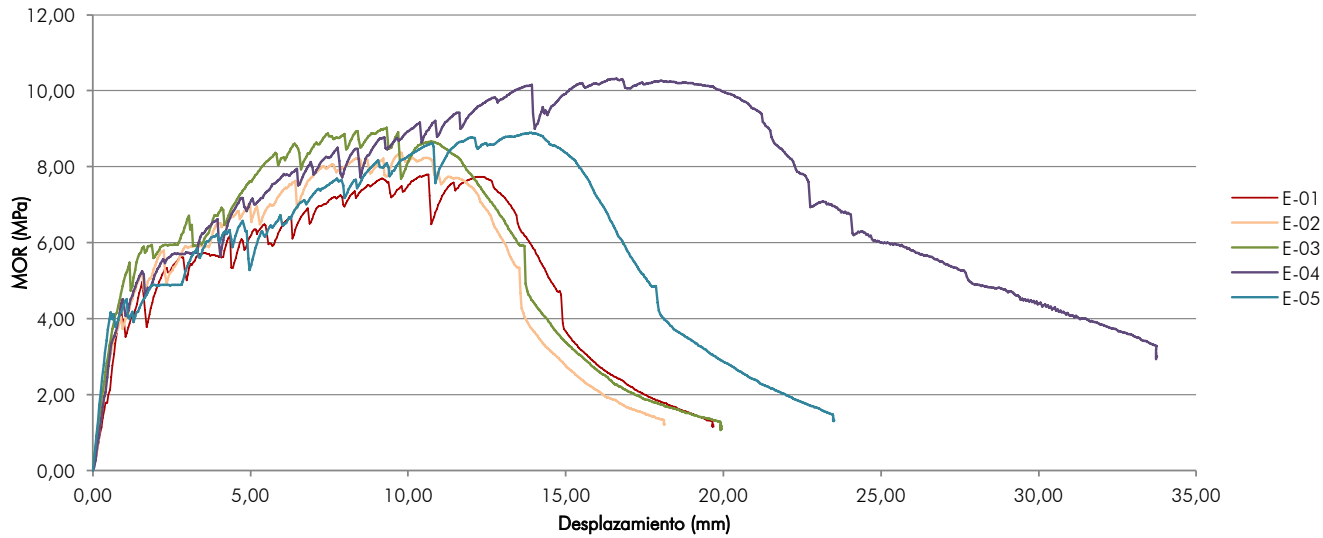
PANEL BLANCO

E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (Panel Blanco) _ Resultados							
Temp. Promedio del Laboratorio: 22°C				HR del Laboratorio: 49,80%			
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	EDAD	CICLOS	MOR			MOE
				80%	1º GRIETA	MÁX.	
				Mpa	Mpa	Mpa	GPa.
PB-01	E-01	104 días	Envejecido Natural 60 días	3,63	4,41	7,79	4,11
PB-01	E-02	104 días	Envejecido Natural 60 días	3,31	4,04	8,36	5,92
PB-01	E-03	104 días	Envejecido Natural 60 días	4,31	5,47	9,02	5,47
PB-01	E-04	104 días	Envejecido Natural 60 días	3,60	4,51	10,32	5,82
PB-01	E-05	104 días	Envejecido Natural 60 días	3,43	4,16	8,89	7,42
MEDIA:				3,66	4,52	8,88	5,75

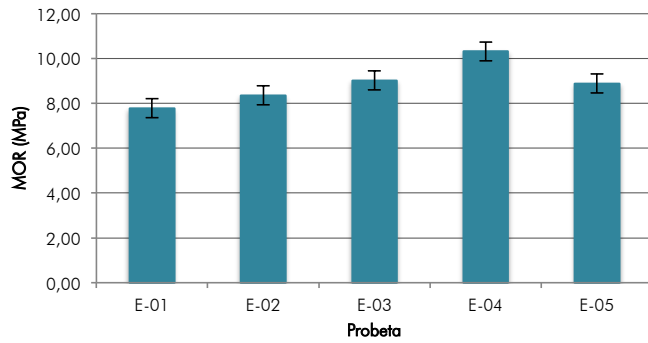
Tabla 42 _ Tabla de resultados del MOR y MOE Panel Blanco(Con Envejecimiento natural). (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

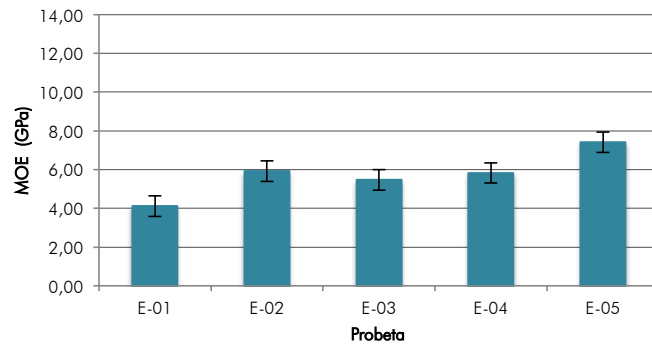
E. ENVEJECIMIENTO NATURAL _ PB-01



E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (P. Blanco) _ Módulo de Rotura



E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (P. Blanco) _ Módulo de Elasticidad



Gráfica 58 _ Comparativo de curvas de Tenso-deformación. Panel Blanco (Fuente Propia)

Gráfica 59 _ Comparativo del MOR Panel Blanco (Fuente Propia)

Gráfica 60 _ Comparativo del MOE Panel Blanco (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

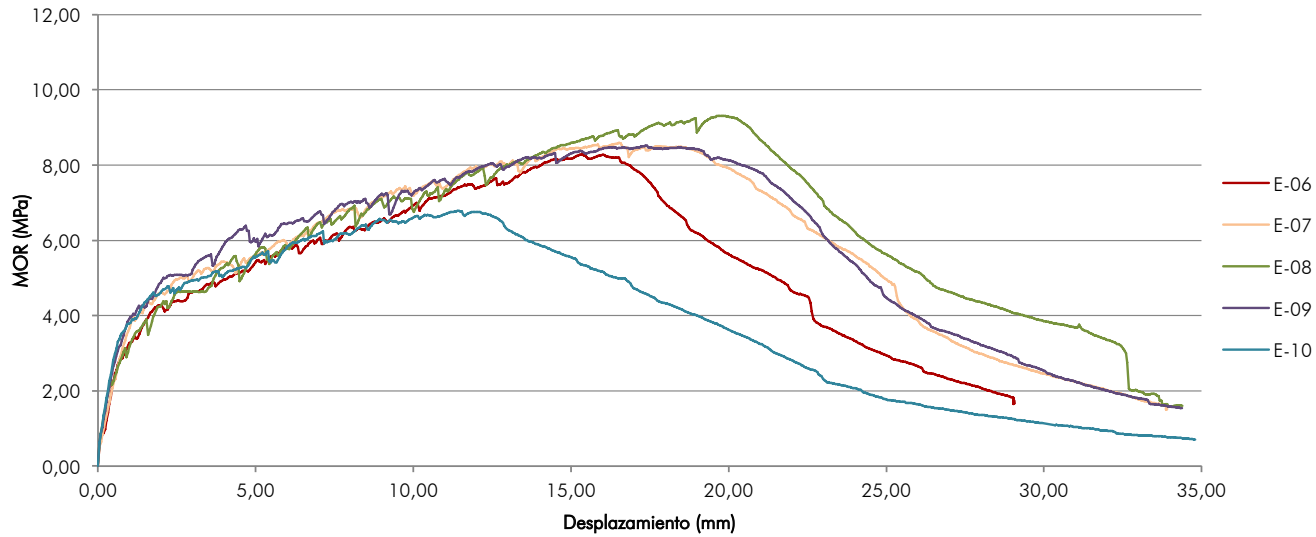
PANEL AMARILLO

E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (Panel Amarillo) _ Resultados							
Temp. Promedio del Laboratorio: 22°C				HR del Laboratorio: 49,80%			
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	EDAD	CICLOS	MOR			MOE
				80%	1° GRIETA	MÁX.	
				Mpa	Mpa	Mpa	GPa.
PA-07	E-06	89 días	Envejecido Natural 54 días	2,28	2,92	8,30	4,20
PA-07	E-07	89 días	Envejecido Natural 54 días	3,26	4,00	8,59	3,21
PA-07	E-08	89 días	Envejecido Natural 54 días	1,72	2,26	9,31	4,38
PA-07	E-09	89 días	Envejecido Natural 54 días	3,47	4,26	8,51	3,72
PA-07	E-10	89 días	Envejecido Natural 54 días	3,71	4,61	6,78	3,90
MEDIA:				2,89	3,61	8,30	3,88

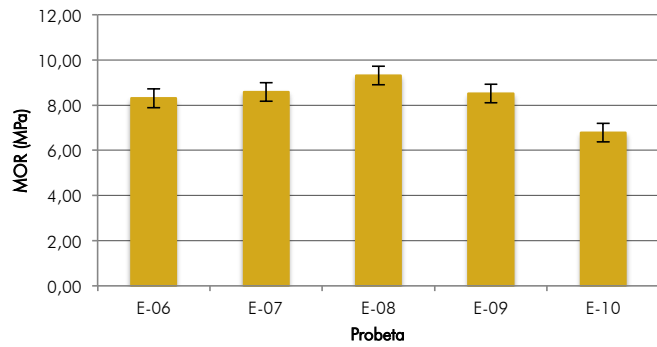
Tabla 43 _ Tabla de resultados del MOR y MOE Panel Amarillo(Con Envejecimiento natural). (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

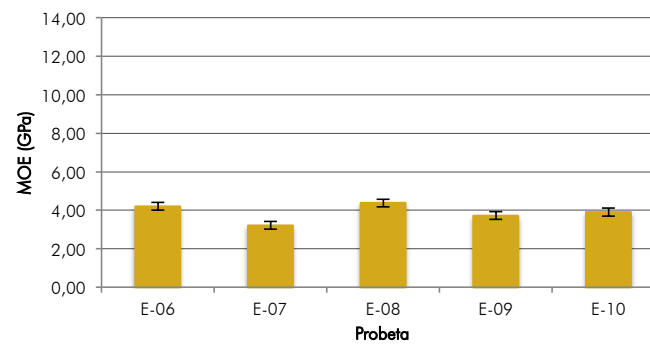
E. ENVEJECIMIENTO NATURAL _ PA-07



E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (P. Amarillo) _ Módulo de Rotura



E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (P. Amarillo) _ Módulo de Elasticidad



Gráfica 61 _ Comparativo de curvas de Tenso-deformación. Panel Amarillo (Fuente Propia)

Gráfica 62 _ Comparativo del MOR Panel Amarillo (Fuente Propia)

Gráfica 63 _ Comparativo del MOE Panel Amarillo (Fuente Propia)

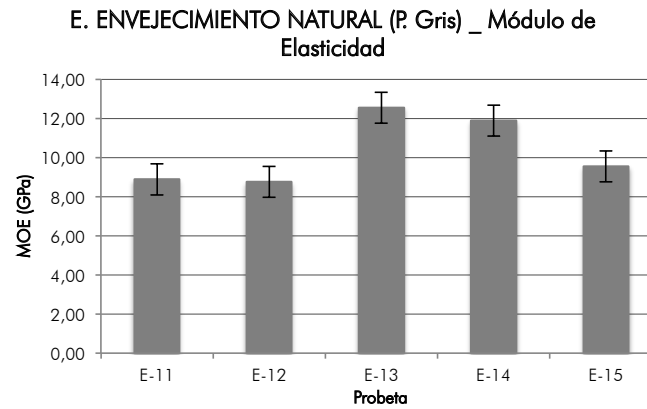
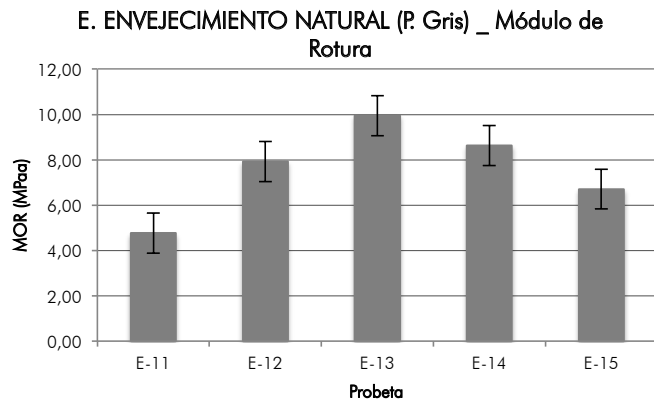
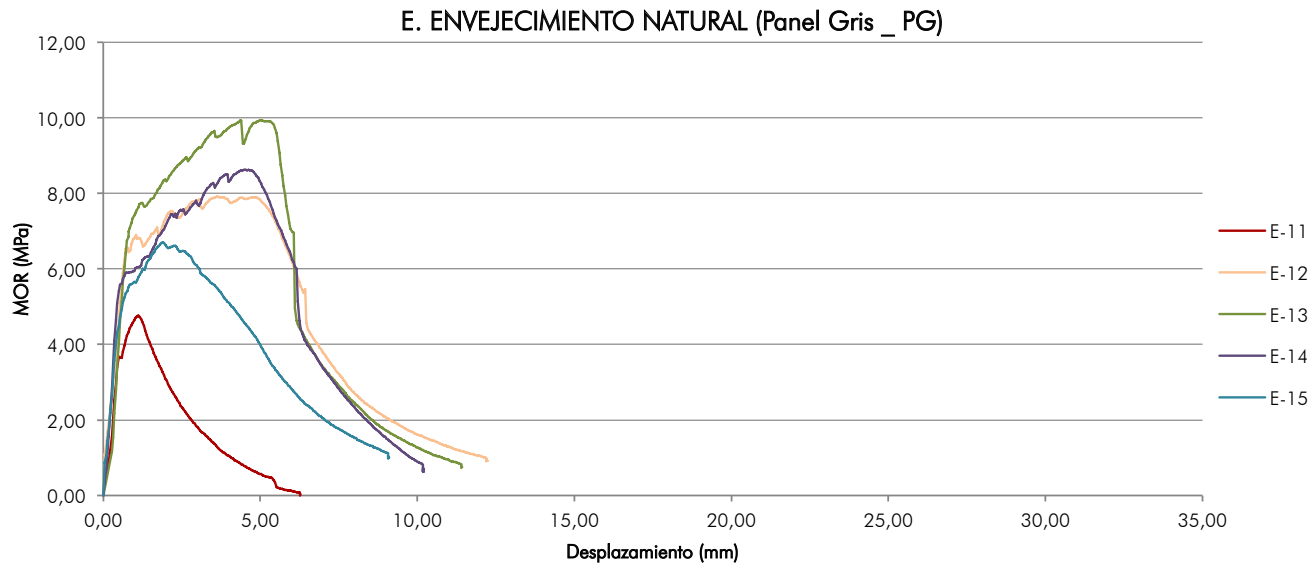
5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

PANEL GRIS

E. ENVEJECIMIENTO NATURAL (Panel Gris) _ Resultados							
Temp. Promedio del Laboratorio: 22°C				HR del Laboratorio: 49,80%			
CÓDIGO DE PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	EDAD	CICLOS	MOR			MOE
				80%	1º GRIETA	MÁX.	GPa.
				Mpa	Mpa	Mpa	
PG	E-11	86 días	Sin Ciclos	2,97	3,68	4,76	8,88
PG	E-12	86 días	Sin Ciclos	5,09	6,57	7,92	8,75
PG	E-13	86 días	Sin Ciclos	6,07	7,75	9,94	12,55
PG	E-14	86 días	Sin Ciclos	4,66	5,92	8,63	11,88
PG	E-15	86 días	Sin Ciclos	4,47	5,66	6,71	9,54
MEDIA:				4,65	5,91	7,59	10,32

Tabla 44 _ Tabla de resultados del MOR y MOE Panel Gris(Con Envejecimiento natural). (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 64 _ Comparativo de curvas de Tenso-deformación. Panel Gris (Fuente Propia)
 Gráfica 65 _ Comparativo del MOR Panel Gris (Fuente Propia)
 Gráfica 66 _ Comparativo del MOE Panel Gris (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.8.1.1. Energía (Con Envejecimiento natural)

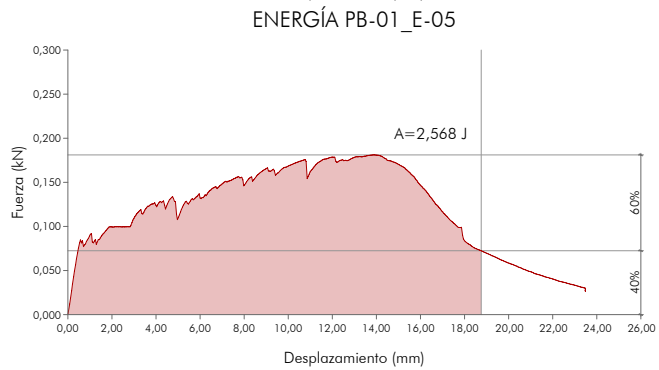
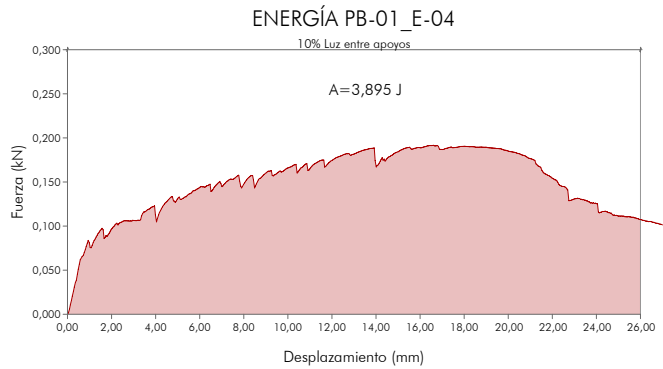
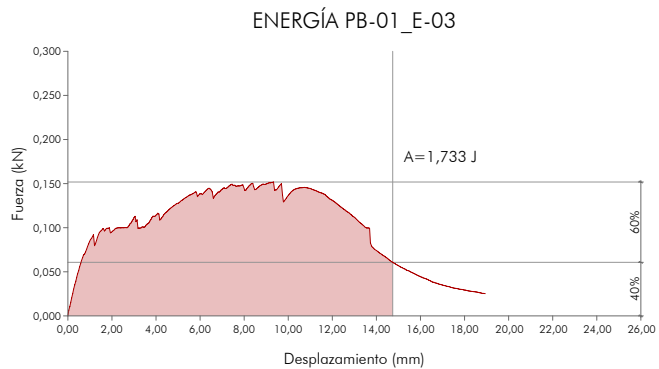
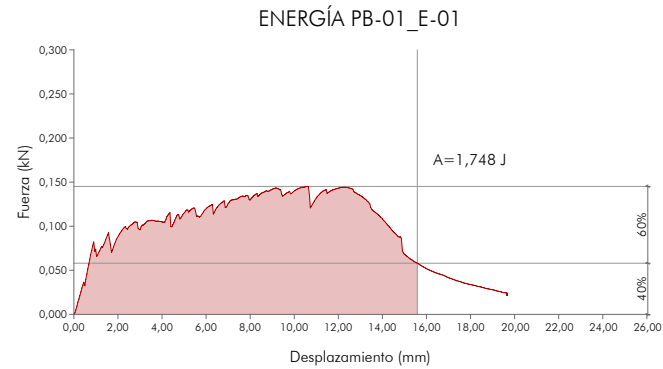
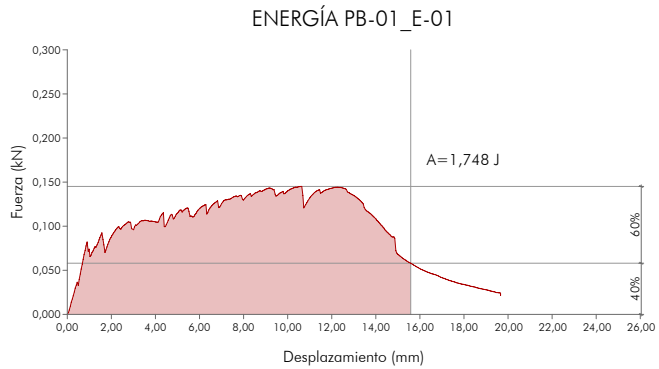
La energía también es mayor comparando con el ensayo de Inmersión-secado.

PANEL BLANCO

ENERGÍA_PANEL BLANCO (Envejecimiento Natural 60 días)					
FÓRMULA	$E = \frac{A}{b \cdot h}$		EDAD: 76 días	CICLOS: Envejecimiento Natural 60 días	
CÓDIGO DEL PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	ÁREA (kJ)	BASE (m)	ESPESOR (m)	ENERGÍA (kJ/m ²)
PB-01	E-01	0,001748	0,052380	0,011780	2,83
PB-01	E-02	0,001642	0,051450	0,011600	2,75
PB-01	E-03	0,001733	0,048500	0,011630	3,07
PB-01	E-04	0,003895	0,050700	0,011950	6,43
PB-01	E-05	0,002568	0,052100	0,012350	3,99
MEDIA DE ENERGÍA:					3,82

Tabla 45_ Energía del Panel Blanco PB-01 (Con Envejecimiento natural). (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



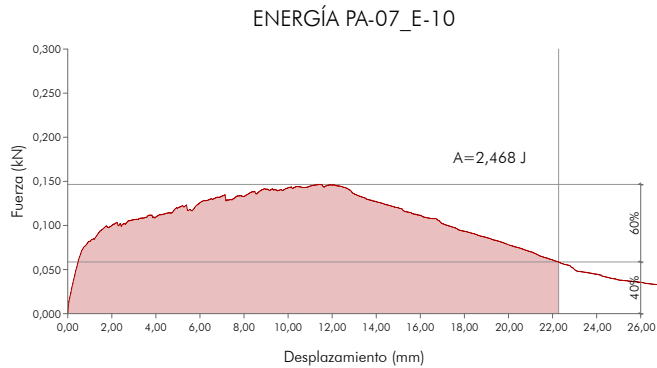
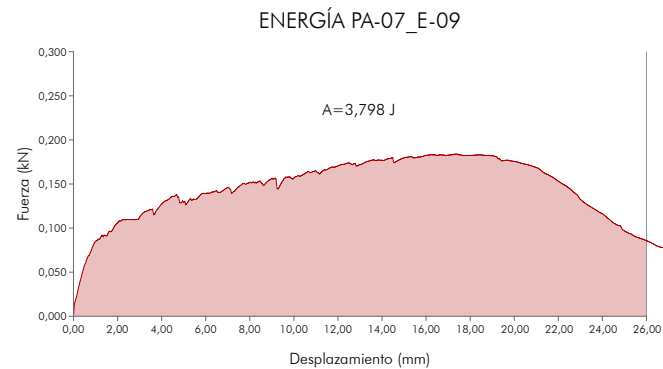
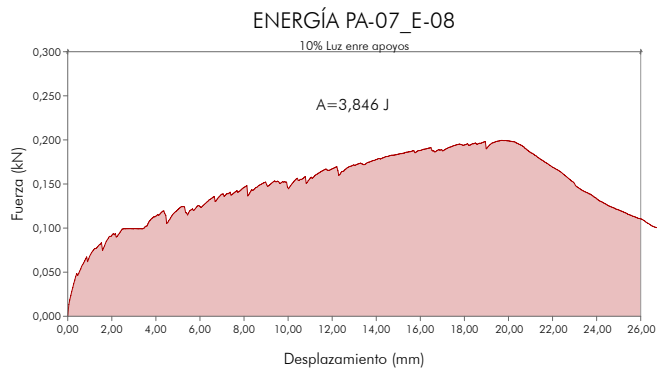
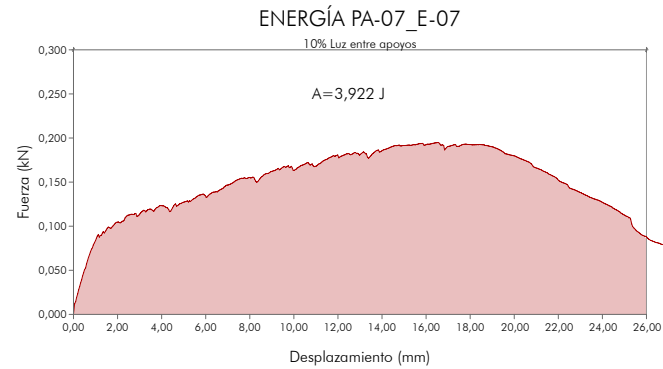
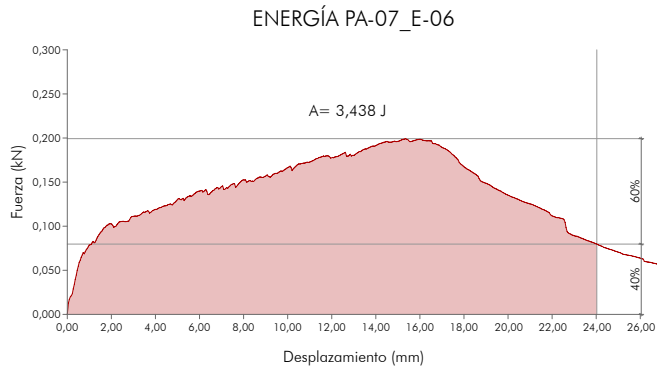
- Gráfica 67 _ Energía PB-01_E-01. (Fuente Propia)
- Gráfica 68 _ Energía PB-01_E-02. (Fuente Propia)
- Gráfica 69 _ Energía PB-01_E-03. (Fuente Propia)
- Gráfica 70 _ Energía PB-01_E-04. (Fuente Propia)
- Gráfica 71 _ Energía PB-01_E-05. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

ENERGÍA_PANEL AMARILLO (Envejecimiento Natural 54 días)					
FÓRMULA	$E = \frac{A}{b \cdot h}$		EDAD: 61 días		CICLOS: Envejecimiento Natural 54 días
CÓDIGO DEL PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	ÁREA (kJ)	BASE (m)	ESPESOR (m)	ENERGÍA (kJ/m ²)
PA-07	E-06	0,003438	0,050780	0,013580	4,99
PA-07	E-07	0,003922	0,051750	0,013080	5,79
PA-07	E-08	0,003846	0,050350	0,012880	5,93
PA-07	E-09	0,003798	0,051050	0,012850	5,79
PA-07	E-10	0,002468	0,049230	0,013080	3,83
MEDIA DE ENERGÍA:					5,27

Tabla 46_ Energía del Panel Amarillo PA-07 (Con Envejecimiento natural). (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 72 _ Energía PA-07_E-06. (Fuente Propia)

Gráfica 73 _ Energía PA-07_E-07. (Fuente Propia)

Gráfica 74 _ Energía PA-07_E-08. (Fuente Propia)

Gráfica 75 _ Energía PA-07_E-09. (Fuente Propia)

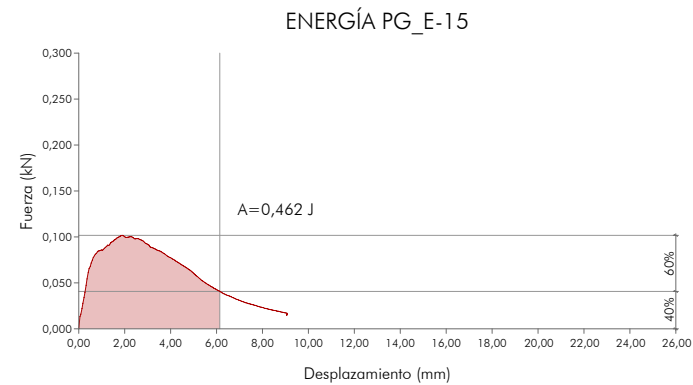
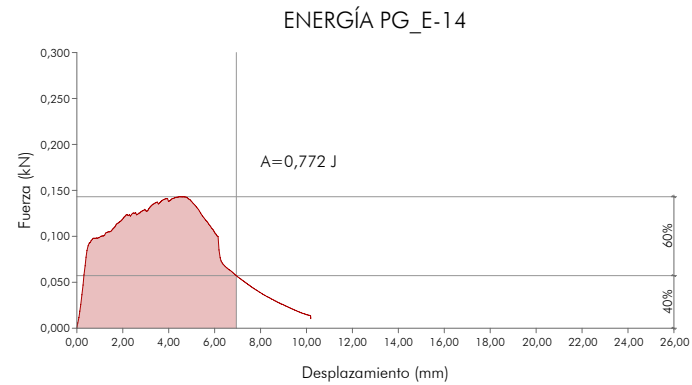
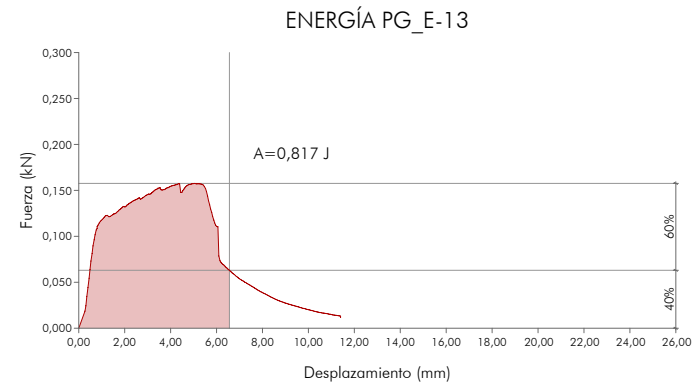
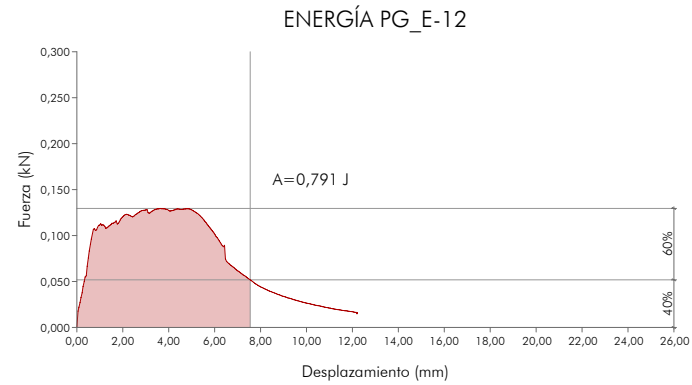
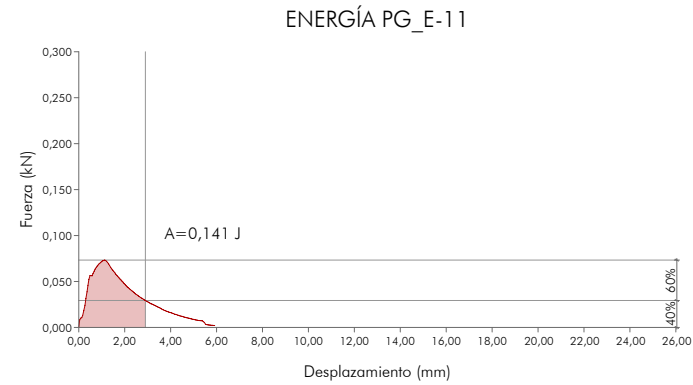
Gráfica 76 _ Energía PA-07_E-10. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

ENERGÍA_PANEL GRIS (Envejecimiento Natural 60 días)					
FÓRMULA	$E = \frac{A}{b \cdot h}$		EDAD: 86 días	CICLOS: Envejecimiento Natural 60 días	
CÓDIGO DEL PANEL	CÓDIGO DE LA PROBETA	ÁREA (kJ)	BASE (m)	ESPESOR (m)	ENERGÍA (kJ/m ²)
PG E-11		0,000141	0,048300	0,011150	0,26
PG E-12		0,000791	0,513000	0,011150	0,14
PG E-13		0,000817	0,051550	0,010950	1,45
PG E-14		0,000772	0,052030	0,011150	1,33
PG E-15		0,000462	0,049330	0,010950	0,86
MEDIA DE ENERGÍA:					0,81

Tabla 47_ Energía del Panel Gris PG (Con Envejecimiento natural).
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



- Gráfica 77 _ Energía PG_E-11. (Fuente Propia)
- Gráfica 78 _ Energía PG_E-12. (Fuente Propia)
- Gráfica 79 _ Energía PG_E-13. (Fuente Propia)
- Gráfica 80 _ Energía PG_E-14. (Fuente Propia)
- Gráfica 81 _ Energía PG_E-15. (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.8.2. E.2 Sensores de Temperatura

Resultados

Con este ensayo se observa las temperaturas que puede llegar a tener un panel expuesto al exterior y como su color incide en ella.

Con las gráficas siguientes podemos ver las temperaturas de los paneles en un semana y un día del mes de agosto. El panel blanco mantiene un rango entre 37 °C (temperaturas máximas) y 23°C (temperaturas mínimas). Valores muy similares a los del panel amarillo, el cual posee el mismo rango en las máximas y 22 °C en las mínimas. Esto no sucede con el panel gris, su temperatura asciende a un rango entre 45°C las temperaturas máximas y 23°C las temperaturas mínimas.

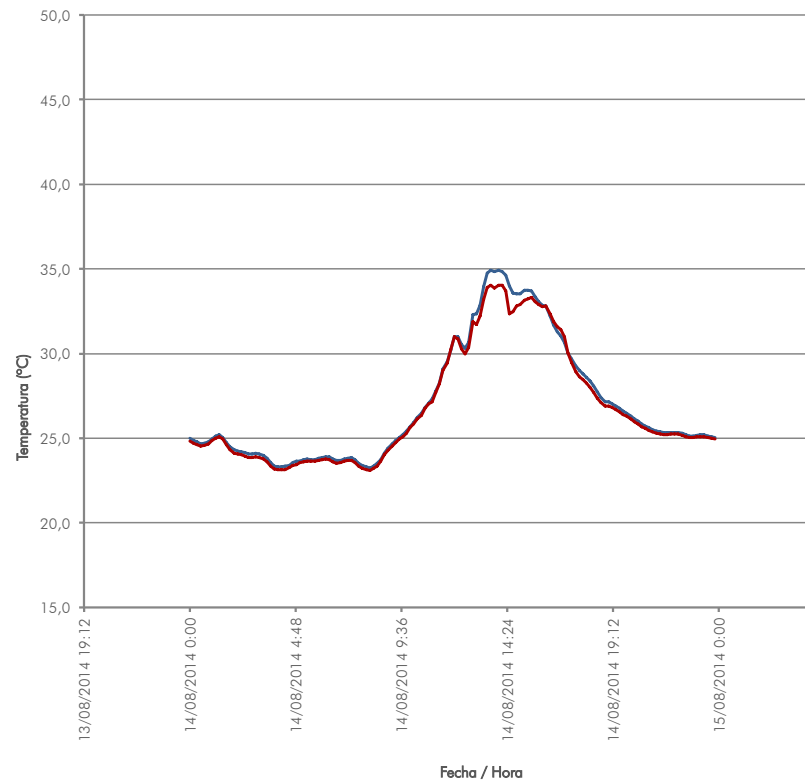
Se observa un hecho un tanto extraño con los sensores del panel gris. Su sensor posterior marca temperaturas más elevadas que el sensor frontal. Se cree que esto es ocasionado por el color del panel, el cual permite elevar mucho más la temperatura que las otras probetas. Por este motivo la cara frontal se calienta y transmite la temperatura al sensor posterior.

Esta gran diferencia entre la temperatura que adquiere el panel gris con respecto a los otros, puede ser la causante de su bajo rendimiento en el ensayo de resistencia a flexión. Pues como se vio en el estado del arte, la temperatura puede ser decisiva en la degradación de la hemicelulosa y la lignina, acelerando la degradación de la fibra.

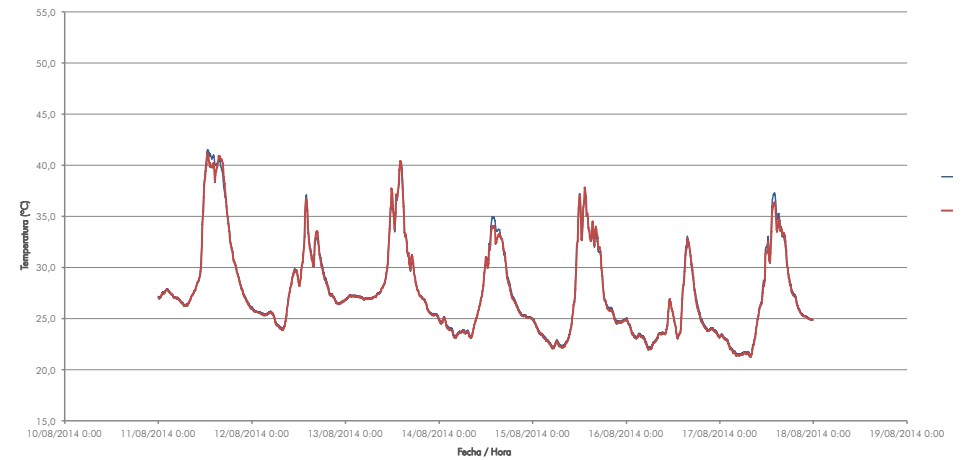
Tabla 47_ Energía del Panel Gris PG (Con Envejecimiento natural).
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

E. SENSOR DE TEMPERATURA - PANEL BLANCO PB-01 (14/08/2014)



E. SENSOR DE TEMPERATURA - PANEL BLANCO PB-01 SEMANA 11/08/2014 - 17/08/2014



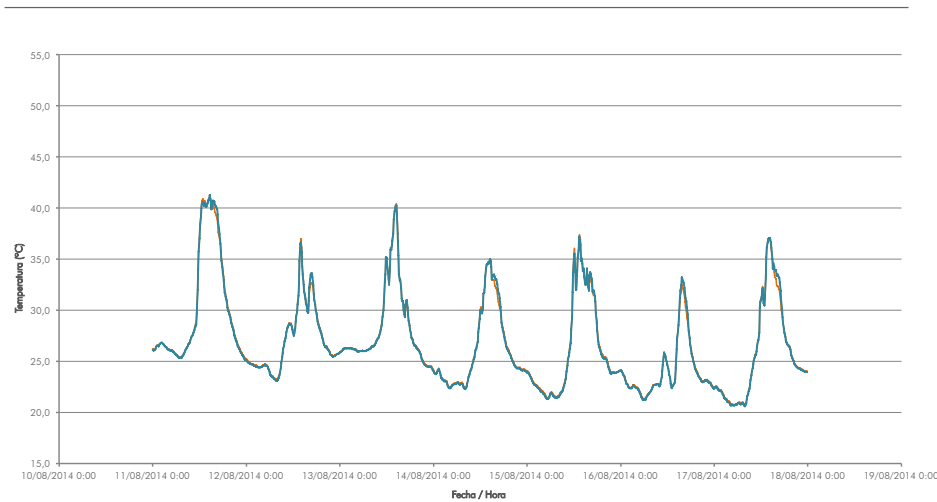
SONDAS

- PB-INTERIOR
- PB-EXTERIOR

Gráfica 82 _ Temperatura del Panel Blanco_semana. (Fuente Propia)
 Gráfica 83 _ Temperatura del Panel Blanco_día (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

E. SENSOR DE TEMPERATURA - PANEL AMARILLO PA-07 SEMANA 11/08/2014 - 17/08/2014



Gráfica 84 _ Temperatura del Panel

Amarillo_semana (Fuente Propia)

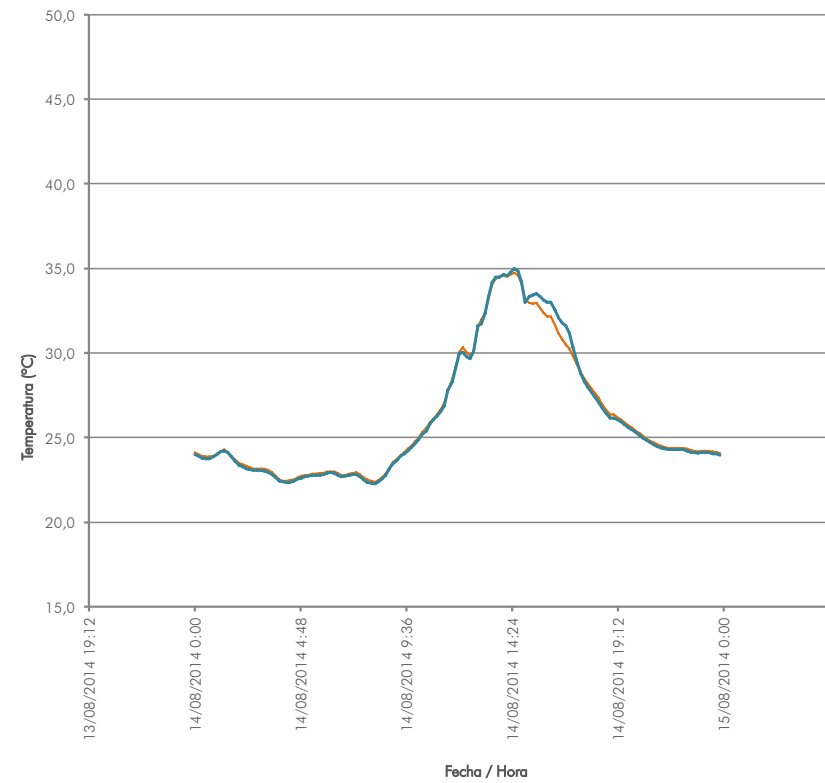
SONDAS

Gráfica 85 _ Temperatura del Panel

Amarillo_día (Fuente Propia)

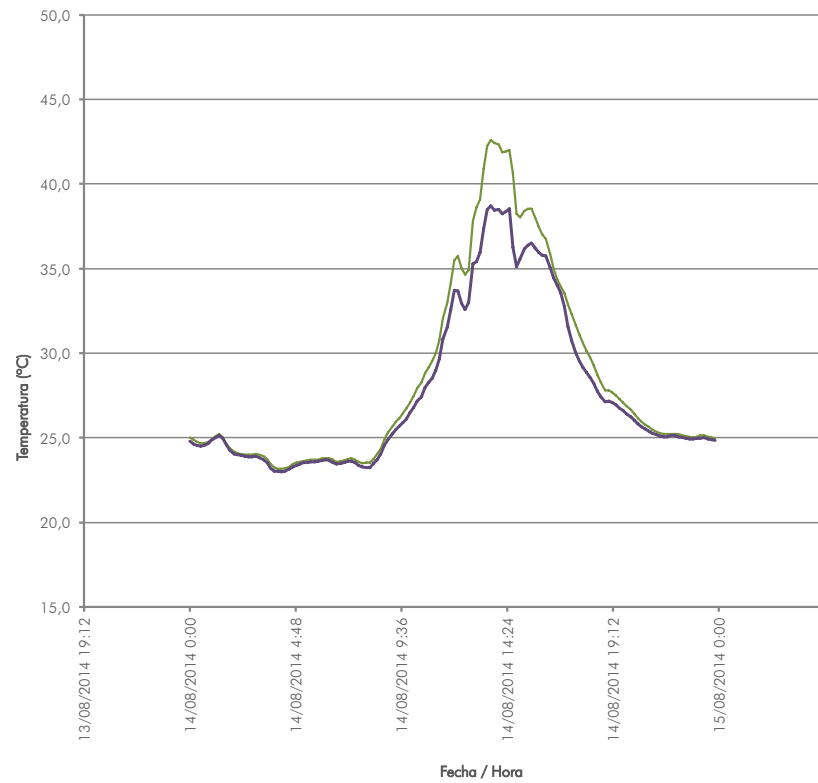
— PA-INTERIOR
— PA-EXTERIOR

E. SENSOR DE TEMPERATURA - PANEL AMARILLO PA-07 (14/08/2014)

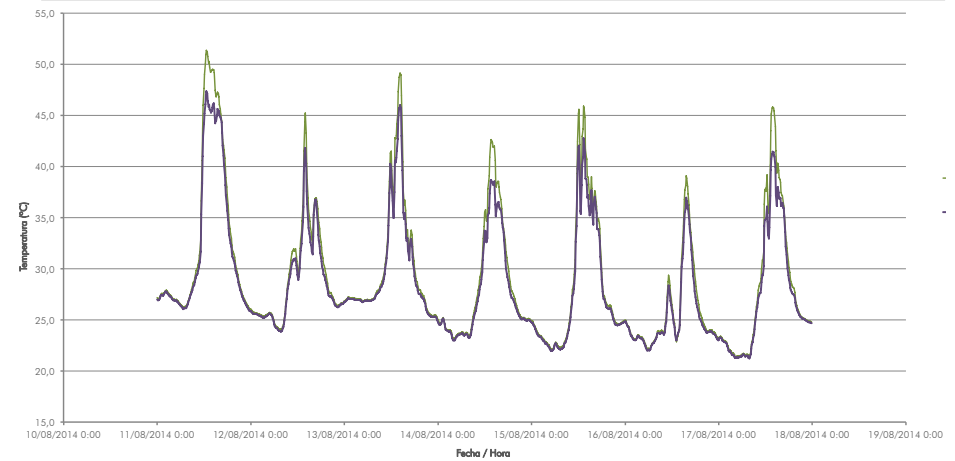


5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

E. SENSOR DE TEMPERATURA - PANEL GRIS PG (14/08/2014)



E. SENSOR DE TEMPERATURA - PANEL GRIS PG SEMANA 11/08/2014 - 17/08/2014



SONDAS

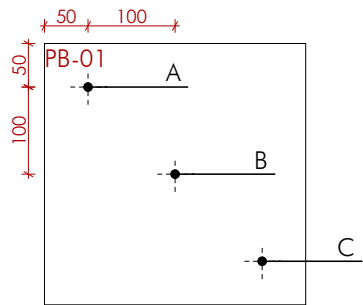
- PG-INTERIOR
- PG-EXTERIOR

Gráfica 86 _ Temperatura del Panel Gris_semana (Fuente Propia)

Gráfica 87 _ Temperatura del Panel Gris_día (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

166



5.3.8.3. E.3 Humedad Relativa

A manera de complemento del ensayo anterior (Sensores de temperatura), se toma la humedad del material para observar su comportamiento conforme aumenta o disminuye la HR del ambiente.

Se toman 2 mediciones al día, la primera entre las 13h00 y 14h00, y la segunda entre las 19h00 y 20h00.

Para cada medición se recogen 3 datos, (Imagen 91). Finalmente se saca la media aritmética y obtenemos la humedad del material. Para ello se emplea un Medidor de humedad de materiales.

En el Anexo 9.8 se adjunta el registro de datos durante el mes de agosto.

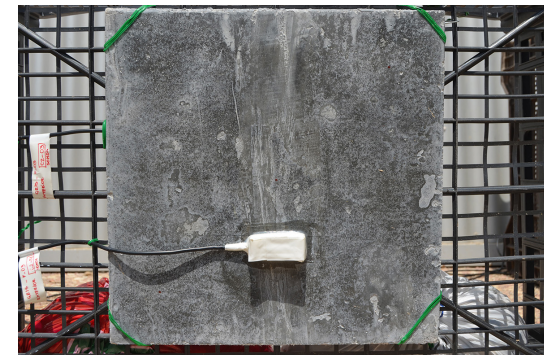
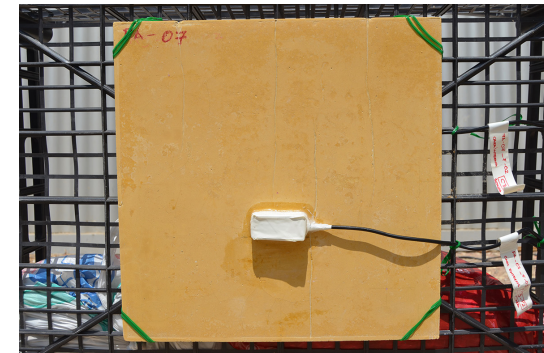
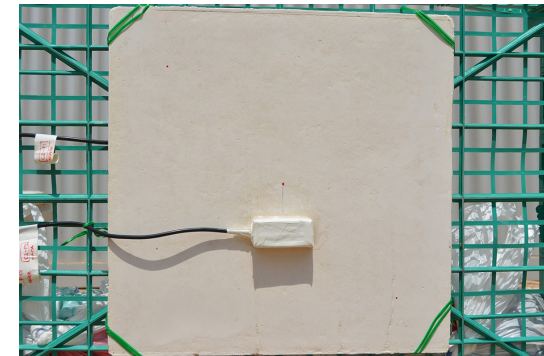


Imagen 91 _ Medición de HR de los paneles.

(Fuente Propia)

Imagen 92 _ Fotografías de las marcas para tomar los datos

(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Resultados

Se observa que el panel gris (PG), al igual que en el ensayo anterior, presenta un rango mayor entre sus máximos y mínimos, esto quiere decir, que absorbe y pierde más humedad que los otros dos paneles.

Posiblemente esta ganancia y pérdida mayor también incide en la durabilidad del compuestos, pues el hidróxido de calcio se desplaza con mayor facilidad acelerando el proceso de envejecimiento del VFRCC.

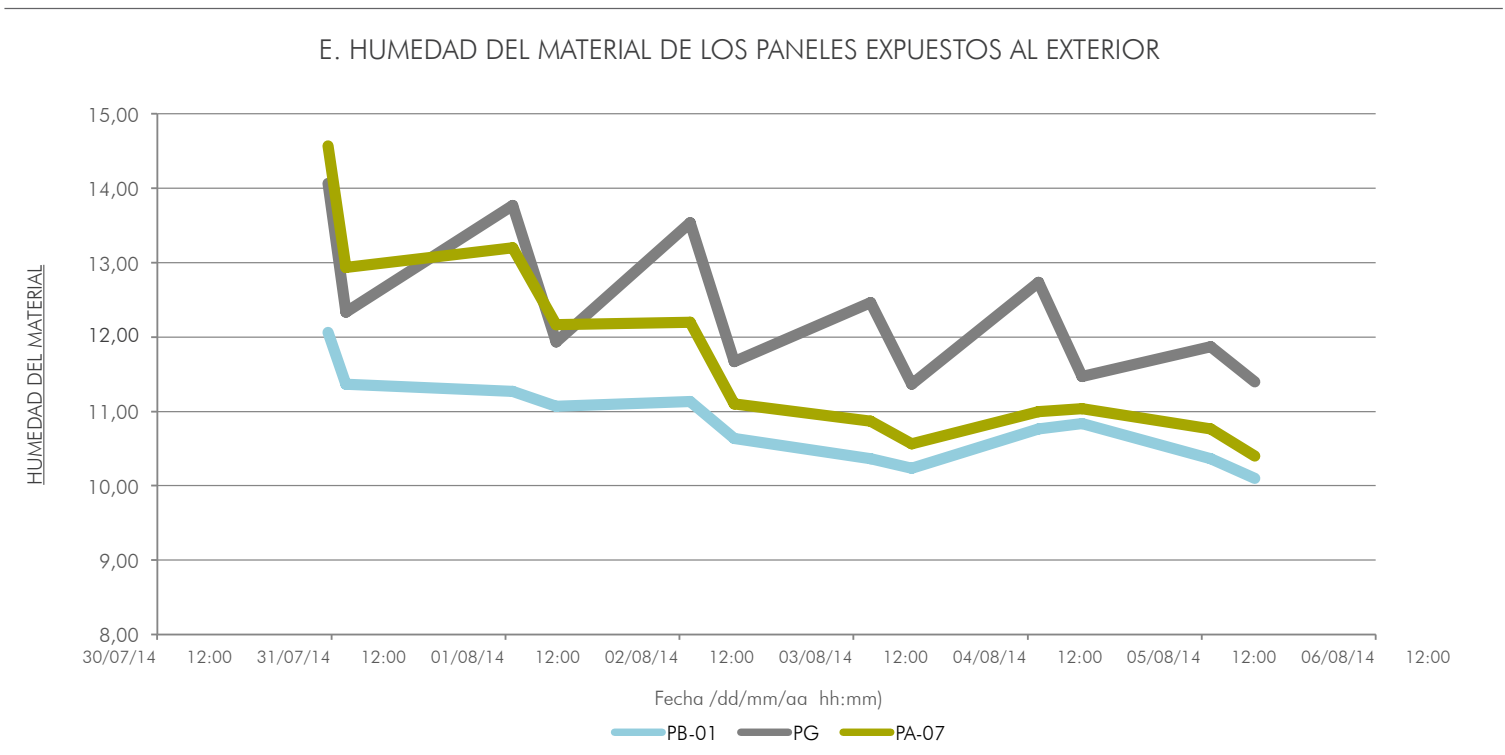
Por otro lado, vemos que los paneles blanco y amarillo son más estables en cuanto a humedad se refiere. Sin duda, esto colabora en la durabilidad del material.

CÓDIGO DEL PANEL	DATOS INICIALES	TOMA DE DATOS	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES		JUEVES		VIERNES		SÁBADO	
			13:20	19:00	13:15	19:20	13:20	19:30	13:50	19:40	13:30	19:30	14:00	18:30
			11/08/14	11/08/14	12/08/14	12/08/14	13/08/14	13/08/14	14/08/14	14/08/14	15/08/14	15/08/14	16/08/14	16/08/14
	PESO (gr)													
EXTERIOR		TEMPERATURA °C			26,20	30,40	26,60	28,00	27,00	27,20	21,50	28,10	25,00	
		HUMEDAD RELATIVA %			64,30	56,00	47,40	36,80	51,10	59,00	70,80	41,00	52,50	
PB-01	2116,5	A	12,30	11,80	11,30	11,50	11,60	10,90	10,60	10,40	10,90	11,50	10,90	10,30
		B	11,60	10,90	10,80	10,60	10,60	10,20	10,20	10,00	10,70	10,60	9,90	9,70
		C	12,30	11,40	11,70	11,10	11,20	10,80	10,30	10,30	10,70	10,40	10,30	10,30
		MEDIA	12,07	11,37	11,27	11,07	11,13	10,63	10,37	10,23	10,77	10,83	10,37	10,10
PG	1874,25	A	14,40	13,20	14,60	13,10	14,30	12,40	13,40	12,20	13,00	12,00	12,70	12,00
		B	13,50	11,40	12,80	11,00	13,10	10,80	11,20	10,00	12,50	10,70	10,90	10,60
		C	14,30	12,40	13,90	11,70	13,20	11,80	12,80	11,90	12,70	11,70	12,00	11,60
		MEDIA	14,07	12,33	13,77	11,93	13,53	11,67	12,47	11,37	12,73	11,47	11,87	11,40
PA-07	2369,25	A	15,10	13,30	13,60	12,40	12,80	11,90	11,60	10,80	10,80	11,30	10,90	10,50
		B	13,90	12,50	13,10	11,80	12,00	10,60	10,80	10,40	10,90	10,90	10,50	10,30
		C	14,70	13,00	12,90	12,30	11,80	10,80	10,20	10,50	11,30	10,90	10,90	10,40
		MEDIA	14,57	12,93	13,20	12,17	12,20	11,10	10,87	10,57	11,00	11,03	10,77	10,40

T Tarde (entre las 13:00 - 14:00)
N Noche (entre las 19:00 - 20:00)

Tabla 48 _ HR de los paneles_semana
(Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Gráfica 88 _ Humedad del material de los paneles_semana (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.8.4. E.4 Escaneo de la superficie antes y después del envejecimiento (análisis del color)

Este análisis ha sido realizado de una manera comparativa simple, donde al mirar las dos imágenes (sin edición), podamos observar un antes y después del envejecimiento natural.

El ensayo fue realizado con un escáner de contacto, el cual no permite el ingreso de luz, de manera que no incida en la imagen.

A simple vista se observa un desgaste en el color del panes amarillo. En el caso del panel blanco, más bien se puede observar la suciedad que este puede adquirir.

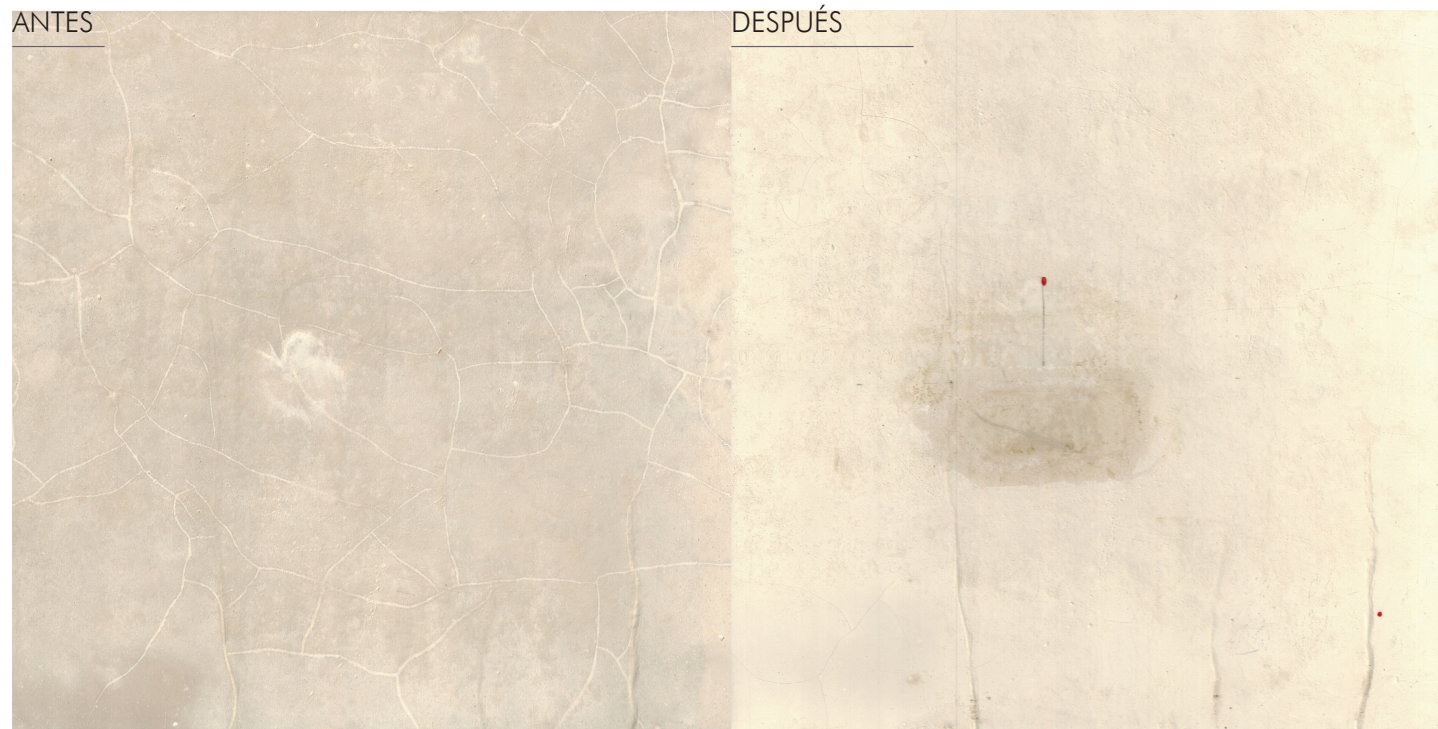


Imagen 93 _ Panel Blanco (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC



Imagen 94 _ Panel Amarillo (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

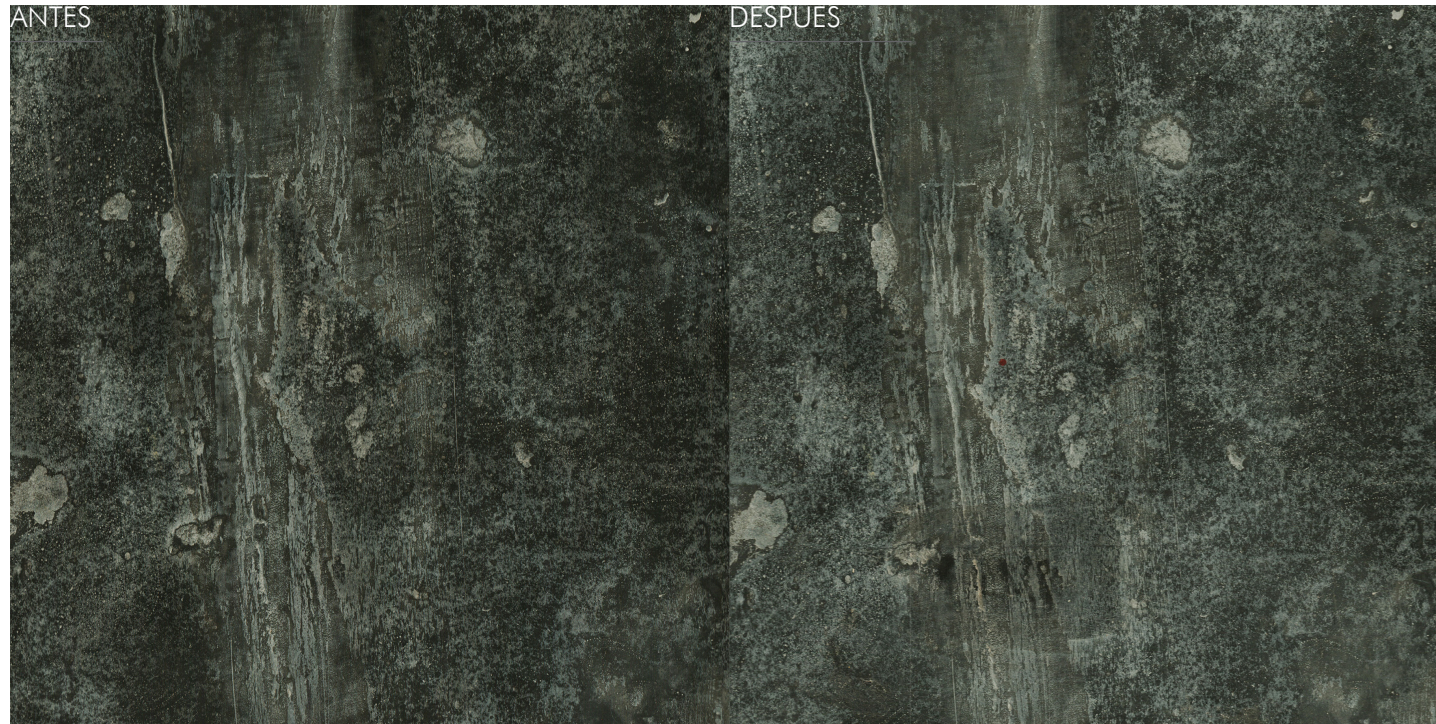


Imagen 95 _ Panel Gris (Fuente Propia)

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

172

5.3.9. F. Densidad

Procedimiento

- De una pedazo cualquiera, en este caso una pieza del ensayo a flexión, se coloca en inmersión en agua a temperatura ambiente hasta llegar a peso constante. Para ello se emplea una balanza cuya exactitud es del 0,1% del peso de la probeta, es decir una centésima de gramo.
- Una vez se llega a peso constante se obtiene el volumen de la pieza mediante inmersión en agua.
- Luego se coloca la muestra en una estufa ventilada a 100°C durante 24 horas.
- Después del secado, se determina la masa.

Interpretación de los datos

Viene dada por la fórmula,

$$d = \frac{m}{V}$$

d densidad aparente (gramos / centímetro cúbico)
 m masa de la probeta, después del secado (gramos)
 V volumen de la probeta (centímetros cúbicos)

Tabla 49 _ Densidad (Fuente Propia)

Tabla 50 _ Porosidad (Fuente Propia)

Resultados

F. DENSIDAD APARENTE			
FORMULA	$d = \frac{m}{V}$	DATOS:	
$d =$	densidad (gr/cm ³)	Peso Aparente=	111,81 gr.
$m =$	masa (gr)	Volúmen=	112,42 cm ³
$V =$	volúmen (cm ³)	Masa en Seco=	189,07 gr.
		Masa en Húmedo=	224,23 gr.
DENSIDAD APARENTE (Seco):		1,68 gr/cm ³	
DENSIDAD EN HÚMEDO:		1,99 gr/cm ³	

F. POROSIDAD			
FORMULA	$P = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100$	DATOS:	
m_h	masa en húmedo (gr)	Masa en Húmedo=	224,23 gr.
m_s	masa en seco (gr)	Masa en Seco=	189,07 gr.
PORCENTAJE DE POROSIDAD:		18,60%	

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.10. G. Dureza superficial

Este ensayo mide única y exclusivamente la dureza de la capa superficial del material a resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, producida por un esfuerzo de contacto local inferido por otro cuerpo más duro, el indentador o penetrador [63].

En ensayo consiste en penetrar un indentador de diamante en forma de pirámide de 4 caras en la superficie del compuesto. Dada la forma del penetrador, queda muy bien definida en el material y facilita la toma de datos. Se mide la diagonales marcadas.

Preparación de la probeta

- Se utiliza la muestra PB-04_B-04
- Se pule por ambas caras con lijas al agua, empezando por la #500, #800, #1200 y #2500. La máquina que se emplea es una pulidora con agua.
- Finalmente se pule con una suspensión de polvo de diamante #1.

Procedimientos

Se configura el durómetro con una presión de carga de 19,6 N (máximo de carga), presión por 5 seg. y se utiliza el objetivo de 10x.

Se toman las medidas en 25 puntos, usando una grilla de $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$.

Resultados

Se saca la media aritmética de los valores obtenidos.

El compuesto tiene una Dureza de Vickers de 47,88. Las mediciones se encuentran en el Anexo 9.8.

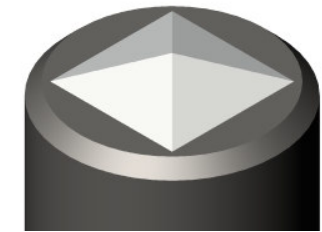
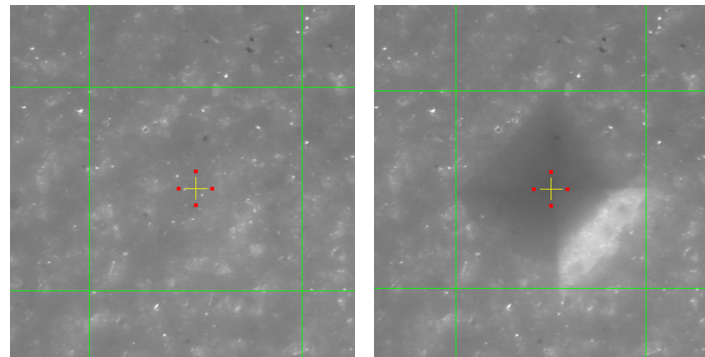


Imagen 96 _ Indentador y toma de medidas del durómetro de Vickers. [63]

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

174

5.3.11. H. Mecanizaciones

Corte de Paneles

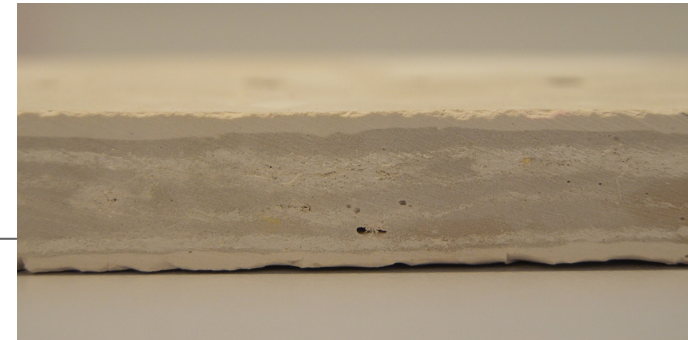
Los VFRCC deben ser cortados con discos circulares de corte que posean un sistema de enfriamiento con agua. Caso contrario, el disco eleva su temperatura y quema el refuerzo de fibra por su calor.

Durante los cortes realizados en todos los ensayos, se observan pequeños desprendimientos en los bordes inferiores de los cantos. Por lo que, para hacer cortes más precisos, se recomienda realizarlos de manera suave y a bajas revoluciones.

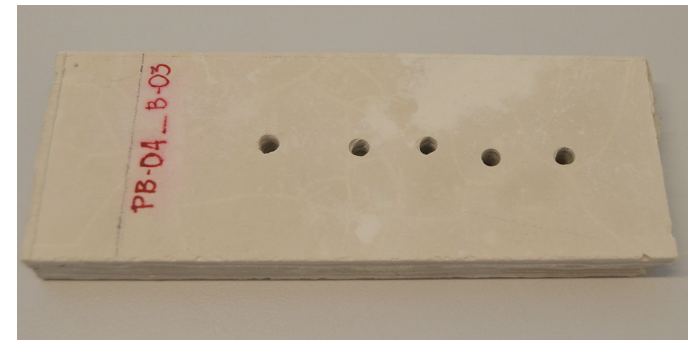
Perforaciones

Se debe emplear brocas con punta de carbono.

Al realizar varias perforaciones se observa desprendimientos de los bordes la capa externa.



a. Bordes inferiores irregulares por corte con sierra



b. Buen ingreso de la perforación.



c. Desprendimientos en la parte inferior.

Imagen 98 _ Fotografías de los bordes

Imagen 99 _ Fotografías de las perforaciones

5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

5.3.12. I. Micrografía SEM

Los ensayos fueron realizados en la ETSEIAT y para el cual utilizamos un Microscopio Electrónico de Barrido SEM, con un voltaje de 5 y 10 kV.

En el laboratorio se rompen piezas pequeñas de manera manual para observar la superficie de corte. Inmediatamente después y teniendo mucho cuidado en no tocarlas con los dedos, se las metaliza utilizando oro. Posteriormente son observadas en el microscopio.

Observaciones Generales Panel Blanco (Sin Ciclos)

- Presenta fibras largas, lo que significa que las fibras no están degradadas.
- La fibras se observan enteras, en buen estado.
- No presentan grietas por deterioro.



175

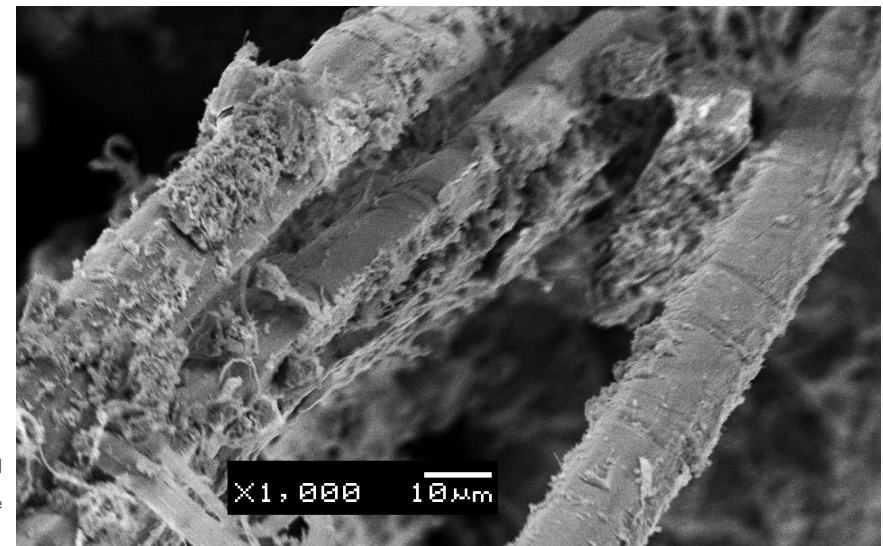


Imagen 100 _ Micrografía SEM, Panel Blanco (Sin Ciclos). (Fuente Propia)

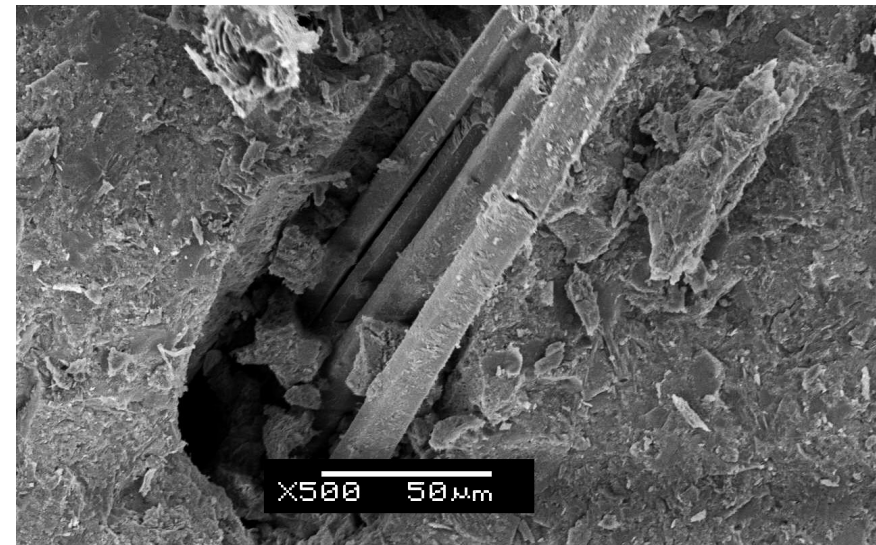
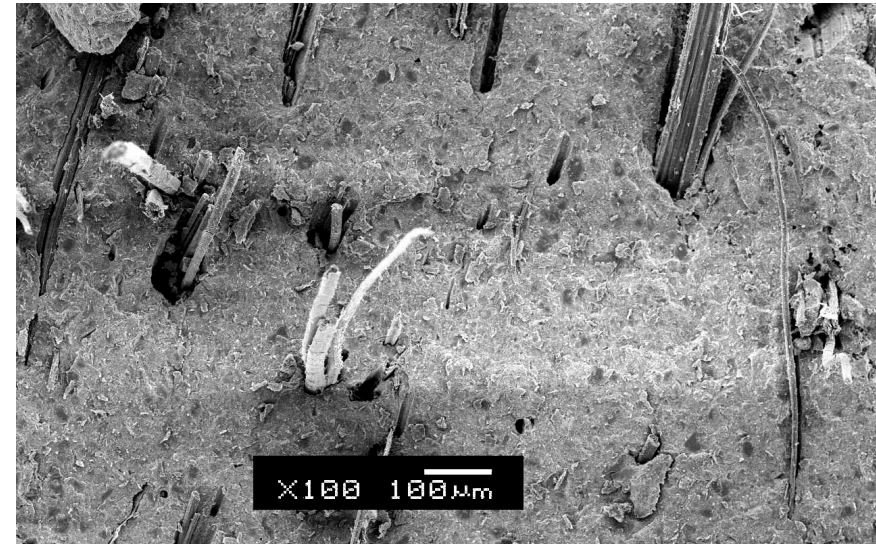
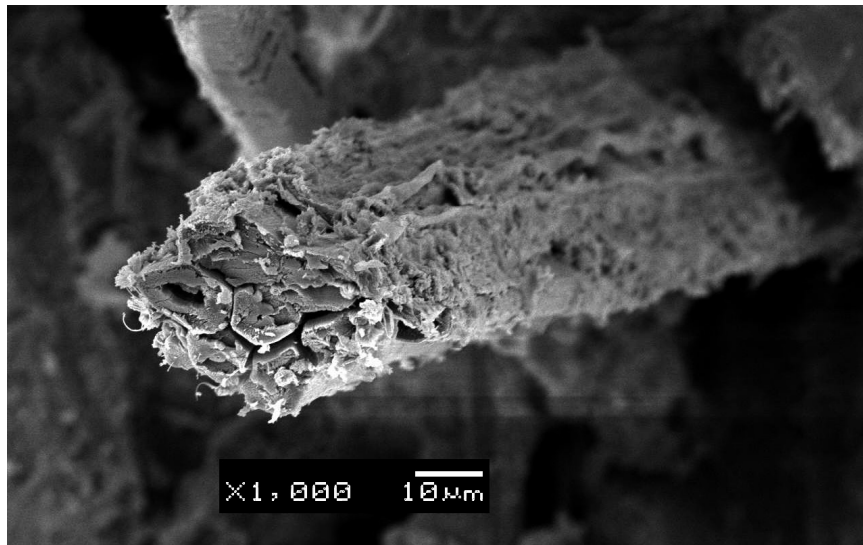
5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Observaciones Generales Panel Blanco (Con Ciclos)

- Las fibras son cortas, es decir están descompuestas.
- Se observa que la fibra ha perdido sección y ya no tiene total adherencia con la matriz.
- Existen vacíos alrededor de las fibras.
- La fibras de celulosa, en buen estado, se rompen como un material elástico, es decir, se deshilachan. En este caso, las fibras muestran cortes transversales rectos, esto significa que la fibra ha sido totalmente afectada por los compuestos fruto de la hidratación del cemento, como el hidróxido de calcio.

176

Imagen 101 _ Micrografía SEM, Panel
Blanco (Con Ciclos).
(Fuente Propia)

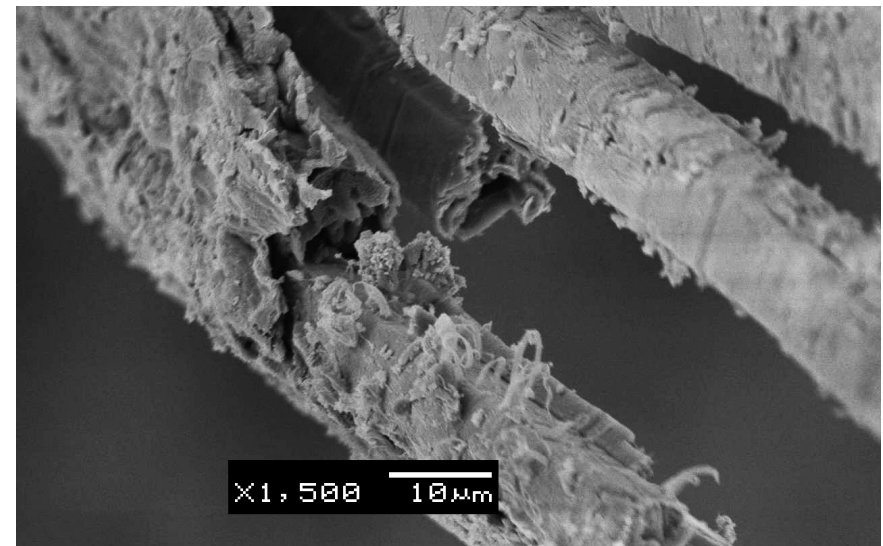
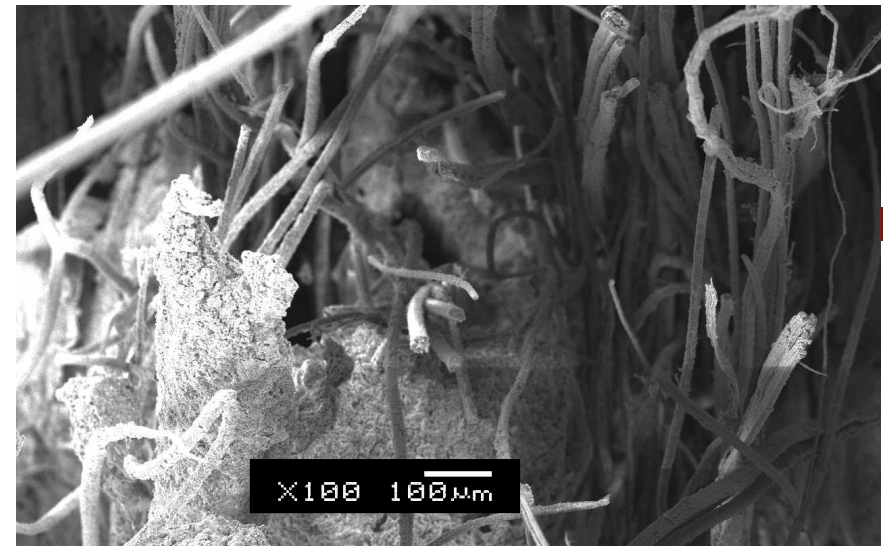
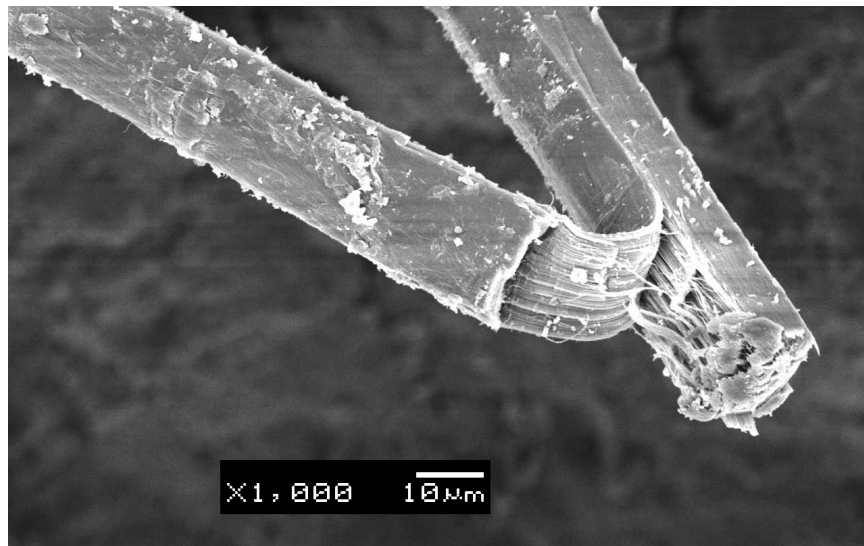


5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Observaciones Generales Panel Blanco (Con Envejecimiento Natural)

- Hay abundancia de fibras largas, enteras, en buen estado.
- No se observa signos de daño por los productos de la hidratación del cemento.
- La fibra rota, se deshilacha y no se corta transversalmente.

Imagen 102 _ Micrografía SEM, Panel Blanco (Con Envejecimiento Natural). (Fuente Propia)



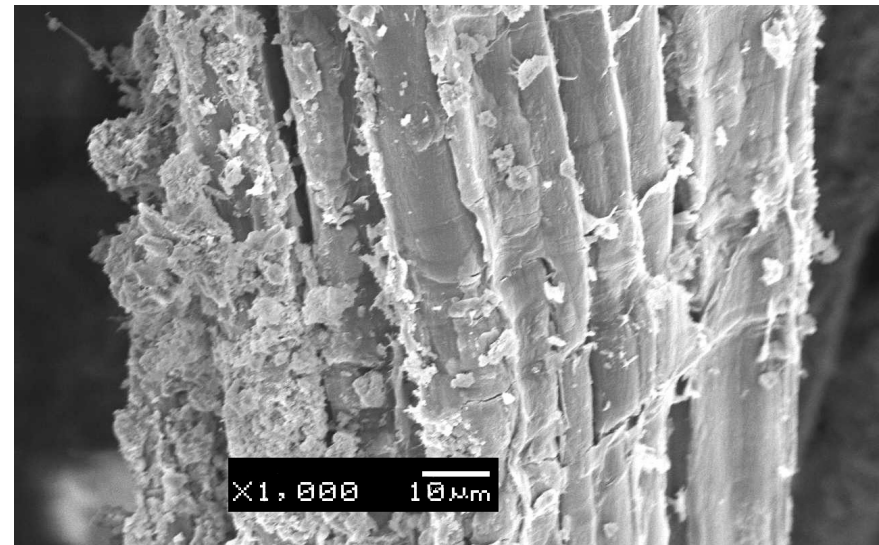
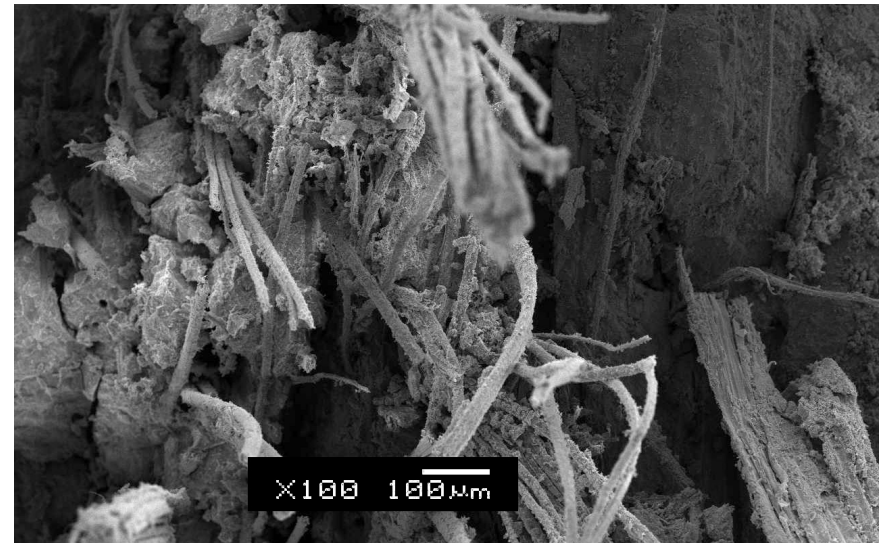
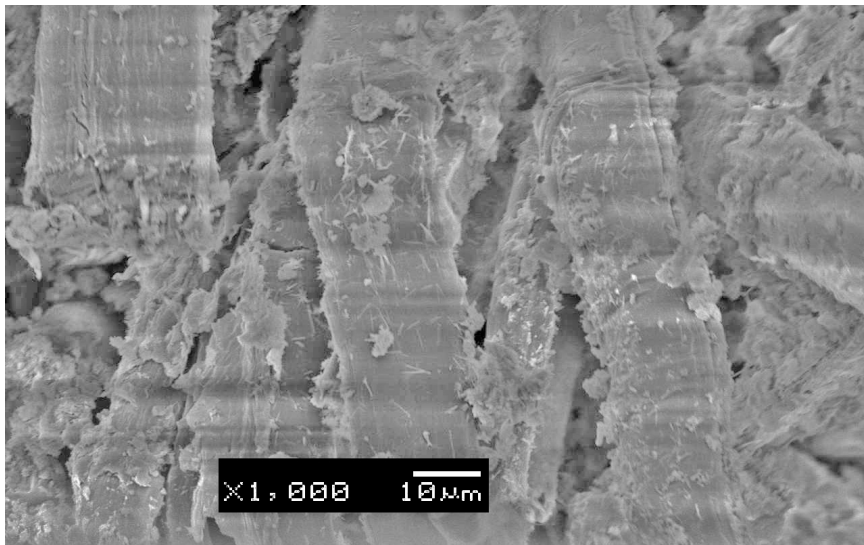
5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

Observaciones Generales Panel Amarillo (Con Envejecimiento Natural)

- Muestra bastante cantidad de fibra, sin descamaciones.
- Las fibras se observan enteras, en buen estado.

178

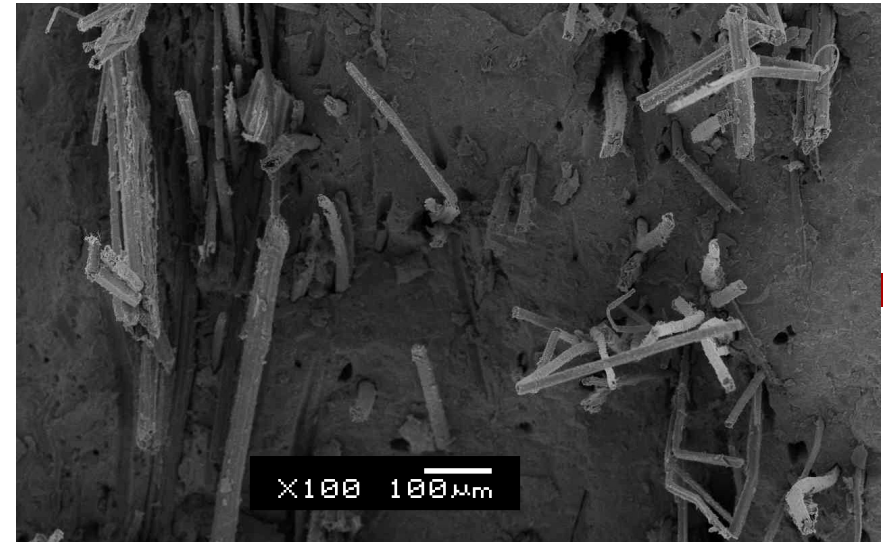
Imagen 103 _ Micrografía SEM, Panel
Amarillo. (Fuente
Propia)



5.3. Ensayos de caracterización del VFRCC

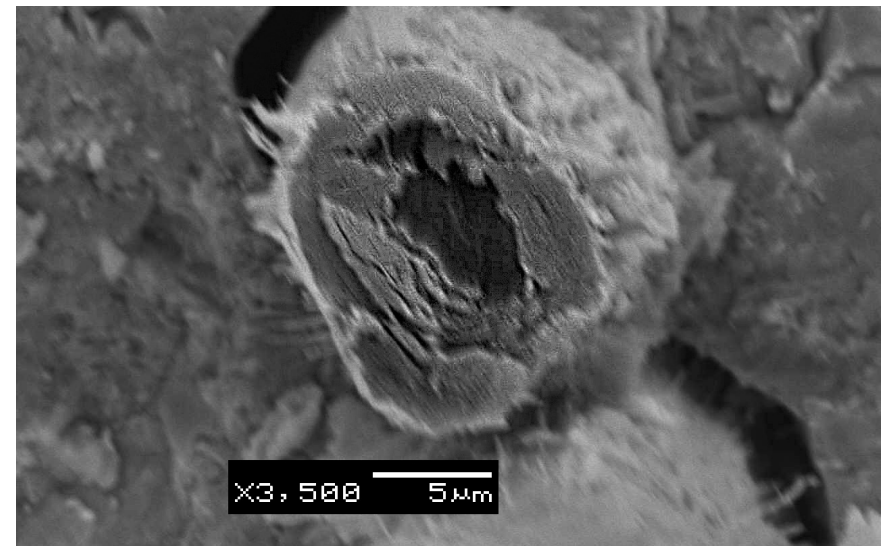
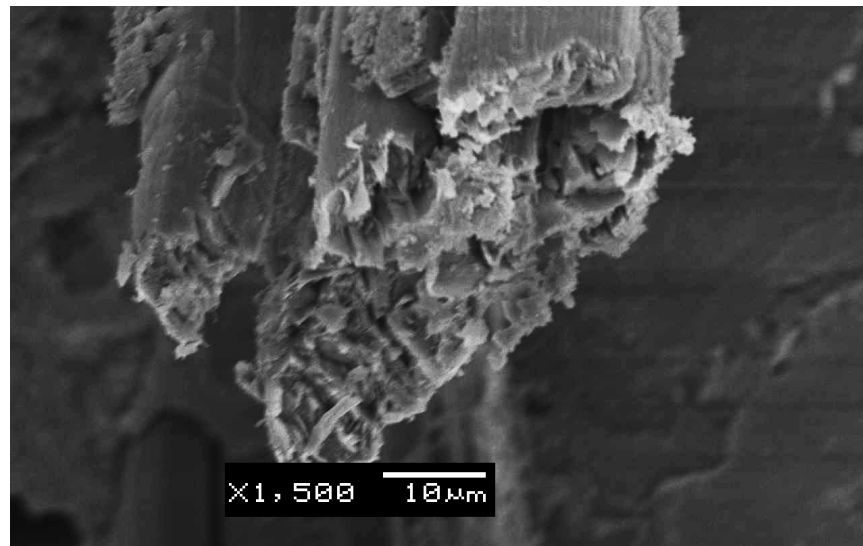
Observaciones Generales Panel Gris (Con Envejecimiento Natural)

- Al igual que el panel blanco con ciclos, muestra severos daños en la fibra.
- Falta de adherencia fibra-matriz.
- Fibras cortas y deterioradas.



179

Imagen 104 _ Micrografía SEM, Panel Gris
(Fuente Propia)



6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

6.1. Aprobación de los objetivos planteados en la campaña experimental

Tal como se ven en la Tabla 51, los principales objetivos planteados al inicio de la Campaña Experimental con respecto a la Norma UNE EN 12467:2013, en cuanto a Resistencia a la Intemperie y Resistencia al Momento Flector no se lograron cumplir. El primero, vimos cómo la disminución del MOR tras 25 ciclos de Inmersión y Secado es menor al 75% que exige la norma. Y el segundo, los valores a los que se esperaba llegar no fueron posibles.

Nuevamente, se estima que la falta de fluidificante influye en el MOR. Debido a la carencia de este aditivo, se aumentó la relación A/C para obtener una mezcla más líquida, la cual pueda ser absorbida por el NW. Posiblemente una relación A/C menor, aumentaría la resistencia de la matriz, y además, por ser más fluida penetraría de mejor manera en el NW aumentando la adherencia fibra-matriz.

Tabla 51 _ Objetivos planteados en cuanto a la clasificación de la Norma UNE EN 12467:2013

CLASIFICACION SEGÚN LA NORMA UNE EN 12467:2013					
CLASIFICACIONES SEGÚN:	TIPOS	CRITERIOS	OBJETIVO ESPERADO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	OBJETIVO LOGRADO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	
RESISTENCIA A LA INTEMPERIE	Categoría A	Puede estar sometidas a calor, humedad elevada y fuertes heladas.			
	Categoría B	Pueden estar sometidas a calor, humedad y alguna helada ocasional.	✓	✗	
	Categoría C	Aplicaciones en interiores, pueden estar sometidas a calor y humedad pero no a heladas.			
	Categoría D	Aplicaciones sobre capa rígida.			
RESISTENCIA AL MOMENTO FLECTOR	Clase 1	Categoría A y B 4 Mpa			
		Categoría C y D 4 Mpa			
	Clase 2	Categoría A y B 7 Mpa		✓	
		Categoría C y D 7 Mpa			
	Clase 3	Categoría A y B 13 Mpa			
		Categoría C y D 10 Mpa			
	Clase 4	Categoría A y B 18 Mpa			
		Categoría C y D 16 Mpa			
	Clase 5	Categoría A y B 24 Mpa		✓	✗
		Categoría C y D 22 Mpa			
GRUPO DIMENSIONAL	Pequeño tamaño	Método de instalación por super-posición. Generalmente su superficie es <math><0,4 \text{ m}^2</math> y la relación longitud/anchura es $\leq 3</math>$	✓	✓	
	Gran tamaño	También pueden ser consideradas de "pequeño tamaño" siempre que sus tolerancias sean las de una placa pequeñas.			
TOLERANCIAS DIMENSIONALES*	Nivel I	$\pm 3\text{mm}$	✓	✓	
	Nivel II	$\pm 4\text{mm}$			

*Referidas a las placas cuya medida nominal sea $a \leq 600\text{mm}$

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

184



6.2 Textil no-tejido (NW)

Con la utilización del NW se buscaba el incorporar la mayor cantidad de fibras largas, sin que estas se enredasen en el compuesto.

Se logró introducir un promedio de 2,57% de fibra con respecto al peso del aglomerante más el árido

(cemento+metacaolín+árido). Este valor supera algunos estudios donde utilizan fibras largas, pero aún sigue siendo bajo con respecto a estudios con fibras cortas como los citados en el Estado del Ate Académico (4% con pasta kraft [31] o 10% de los asbesto-cemento).

En parte esto se debe a la falta de fluidificante. La matriz fresca al no tener este aditivo, es más espesa y el NW se adhiere a una mayor cantidad de mezcla en comparación a una composición más líquida. Esto hace que para lograr paneles de 10 mm (como era el objetivo), se usen tan sólo 4 capas de NW de fibra.

En la Imagen 105 se observa las capas de fibra y matriz. Lo deseado sería disminuir el espesor de las capas de mezcla y aumentar el número de NW, con la intención de aumentar el contenido de fibra.

De otro punto de vista, el NW fue una buena manera de trabajar con fibras largas. La matriz tiene una adecuada penetración en el NW y con ello se logra obtener buena adherencia fibra-matriz. De igual forma, las fibras no se enredan y facilitan la trabajabilidad.

Imagen 105 _ Corte transversal de un panel. (Fuente Propia)

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

6.3 Impermeabilidad al agua

Como menciona Gram [26], la inserción de fibras no afecta la estanqueidad del panel. El ensayo demostró que el compuesto puede estar en contacto con agua por períodos prolongados, sin si quiera mostrar humedad por la cara opuesta a la exposición.

6.4 Variación Dimensional

De acuerdo a lo observado el panel posee un comportamiento bastante estable dimensionalmente. Dada su fabricación, actúa como un laminado, es decir, en estado húmedo crece longitudinalmente, mientras su espesor disminuye, y en estado seco sucede lo contrario. Esto se debe a que en sentido transversal no posee “elementos de unión” que aten cada una de las capas.

Por otra parte, los resultados vistos son bastante buenos: 0,148% de variación en longitud y 1,075% en espesor.

6.5 Color en el Material

En los tres paneles expuestos a la intemperie, se observó una disminución del porcentaje de color medido a través de la cantidad de RGB (Red, Green, Blue).

Si tenemos como referencia el 0 como máximo de color y el 255 como el mínimo, se puede observar el promedio de color del histograma la pérdida del promedio de color. El panel blanco tiene una pérdida del 8,52%, el panel amarillo un 27,32% y el panel gris un 23,56%. En el caso del panel blanco, aumenta su blancura. Lo mismo sucede con los paneles con color, tienden a aclarar su color.

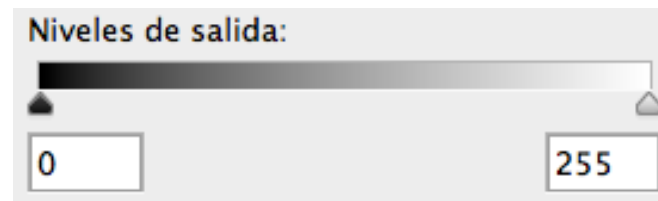


Imagen 106 _ Cantidad de color. (Fuente Propia)

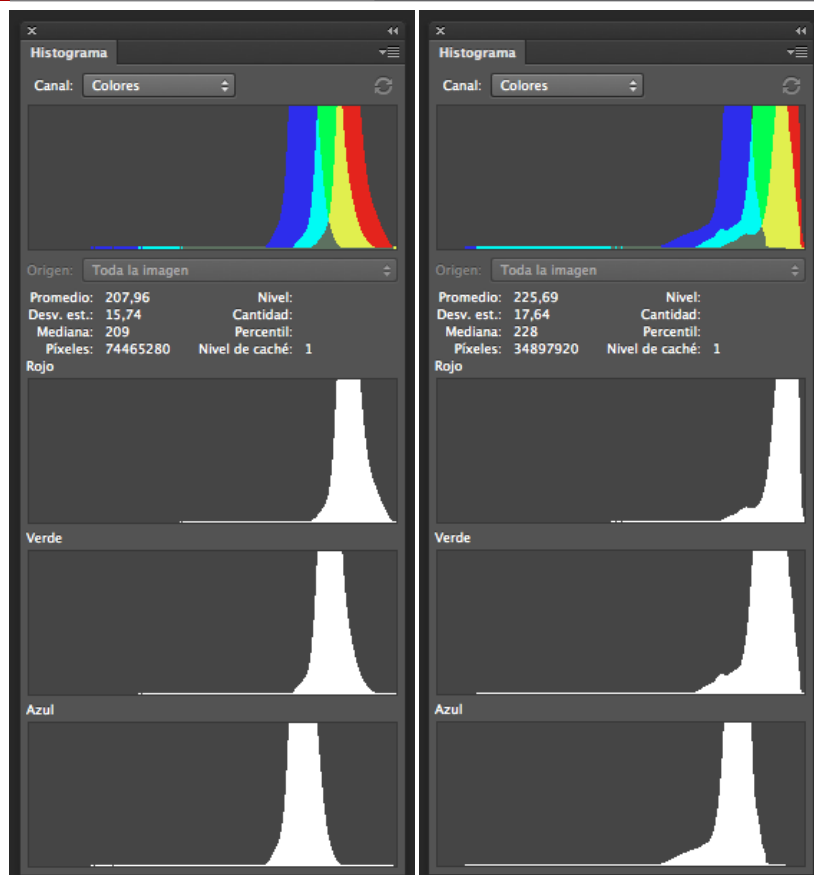
6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

Imagen 107 _ Histograma antes y después de la exposición – Panel Blanco. (Fuente Propia)

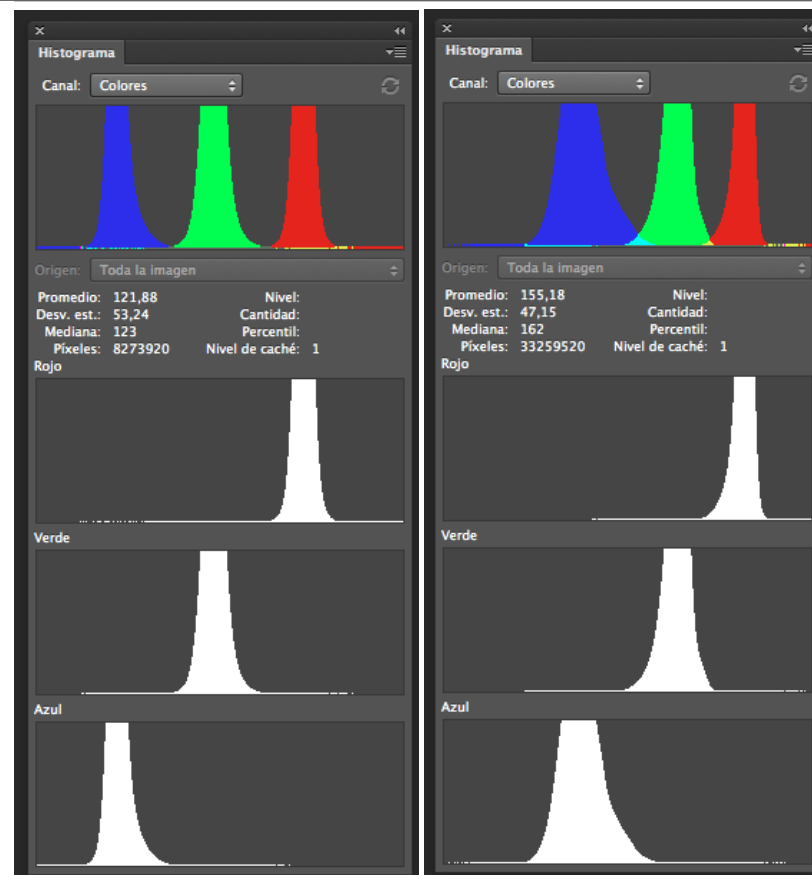
Imagen 108 _ Histograma antes y después de la exposición – Panel Amarillo. (Fuente Propia)

186

Histograma de Antes y Después - Panel Blanco



Histograma de Antes y Después - Panel Amarillo



6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

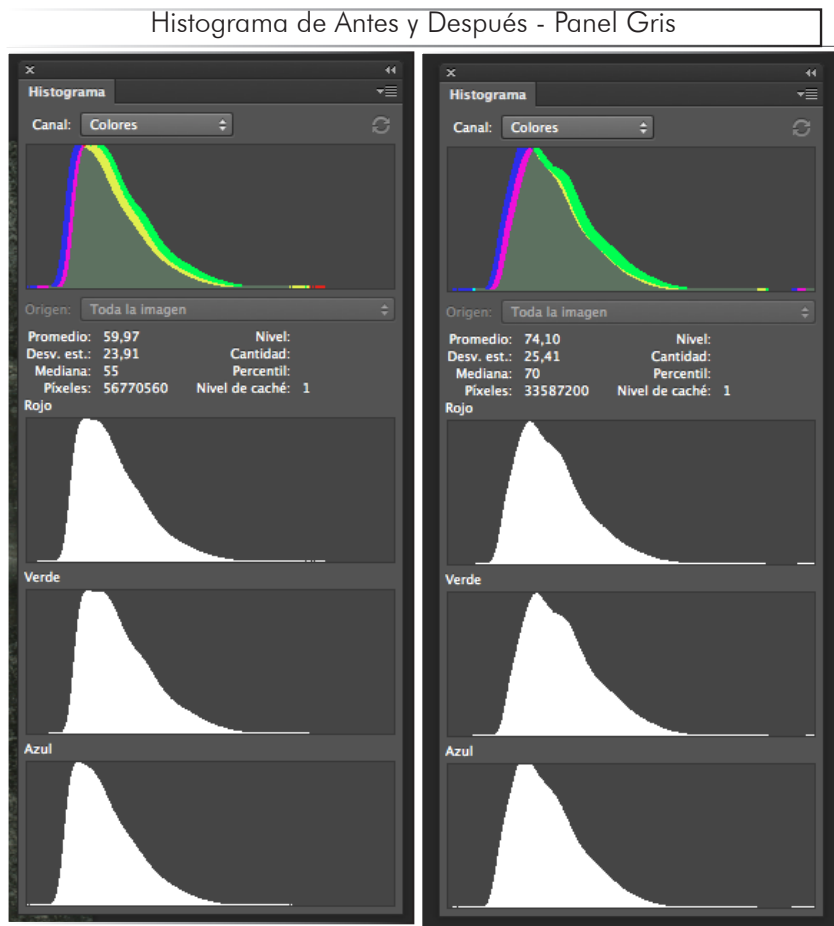


Imagen 109 _ Histograma antes y después de la exposición – Panel Gris. (Fuente Propia)

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

188

43 Compuesto Envejecido con Ciclos de Inmersión y Secado.

44 Compuesto con Envejecimiento Natural por 60 días.

- PANEL SIN CICLOS_ PB-04 (Curva promedio)
- PANEL CON CICLOS (Inmersión - Secado)_ PB-03 (Curva promedio)
- PANEL CON ENVEJECIMIENTO NATURAL (60 días)_ PB-01 (Curva promedio)

6.6. Durabilidad del VFRCC

Se comparan las curvas del MOR que más se acerquen a la media aritmética, para observar su comportamiento.

En la Gráfica 89, se puede mirar la gran disminución de la curva de Tensio-deformación del compuesto envejecido con los ciclos de Inmersión y Secado (CECIS)⁴³. Esto quiere decir, que el MK no ha absorbido del todo el CH, por lo que deteriora la fibra. A esto se añade el calor empleado por el horno, el panel eleva su temperatura y ayuda a acelerar el proceso de envejecimiento, gracias a la descomposición de la lignina y hemicelulosa.

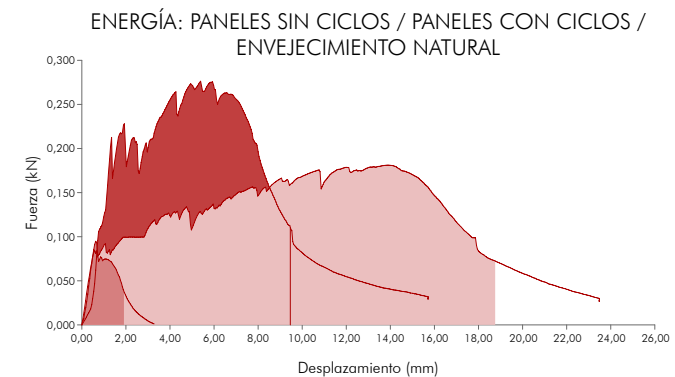
Sin embargo, la curva del compuesto sometido a envejecimiento natural (60 días)(CEN60)⁴⁴, tiene un muy buen comportamiento. Incluso en las imágenes de micrografía SEM, se observa gran cantidad de fibras, largas, en buen estado, etc. Esto significa que el MK ha absorbido el CH, y la fibra se mantiene en buen estado.

Lo sucedido con el CECIS contradice al CEN60. Se puede suponer que la presencia de la fibra influye, posiblemente en el tiempo que tarda el MK en absorber el CH. Siendo un punto que queda pendiente por resolver en una próxima investigación.

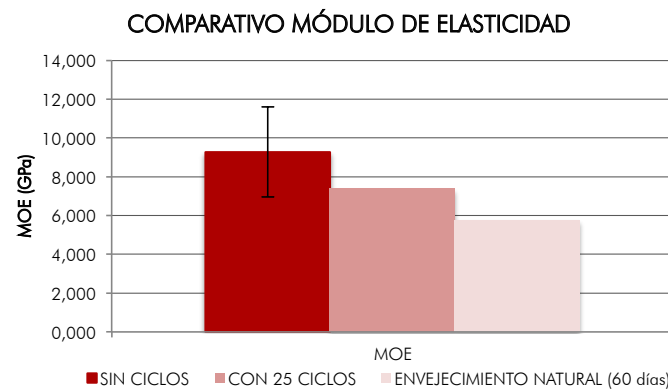
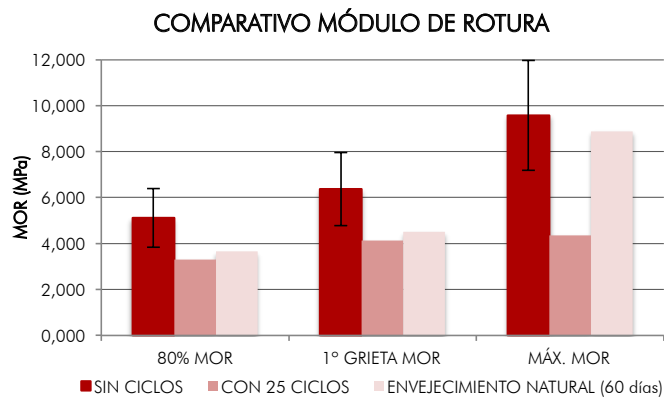
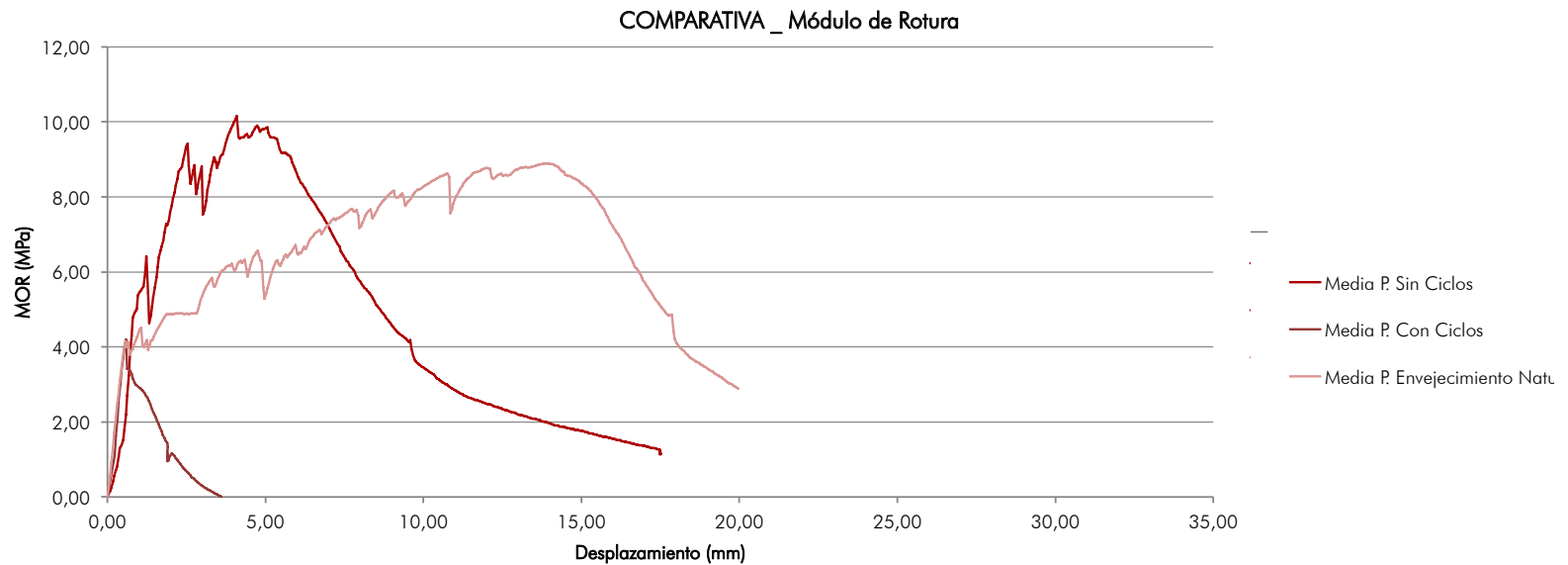
Por otro lado, en la Gráfica 90 vemos que la reducción del MOR es más del 25% que establece la norma. Lo que quiere decir que el producto no pasa una de las pruebas para medir la durabilidad.

Esta misma reducción se observa en la tabla de MOE y de la Energía.

Gráfica 92 _ Comparación de las medias de la Energía. (Fuente Propia)



6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental



Gráfica 89 _ Comparación de las medias del ensayo de resistencia a flexión paneles blancos. (Fuente Propia)

Gráfica 90 _ Comparación de los valores del MOR, en los tres estado de envejecimiento. (Fuente Propia)

Gráfica 91 _ Comparación de los valores del MOE, en los tres estado de envejecimiento. (Fuente Propia)

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

6.7 Comparación entre paneles con Envejecimiento Natural (60 días)

Al hacer una comparativa de los resultados de los paneles envejecidos naturalmente (60 días), vemos que el color influye notoriamente en la absorción de temperatura. Durante los dos meses de exposición el panel gris llega a un máximo de 59,2°C mientras que el panel blanco y amarillo alcanzan los 46,5°C. Esta diferencia en las temperaturas genera que el panel gris tenga un mayor grado de ganancia o pérdida de humedad relativa del material, generando ciclos de envejecimiento (seco-húmedos) más fuertes que los otros paneles.

El panel gris al tener ciclos más fuertes que los otros paneles presenta resultados de resistencia a flexión inferiores; incluso si vemos las imágenes de micrografía SEM presenta un grado de envejecimiento muy parecido al compuesto con ciclos Inmersión y Secado.

En este sentido, se puede sugerir el uso de colores claros, para que la absorción de temperatura sea menor, ayudando al retraso del envejecimiento de la fibra.

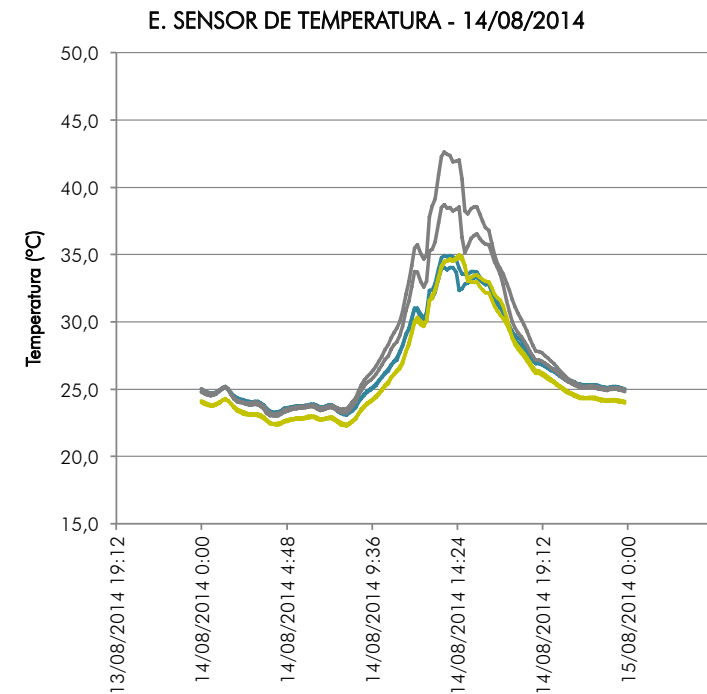
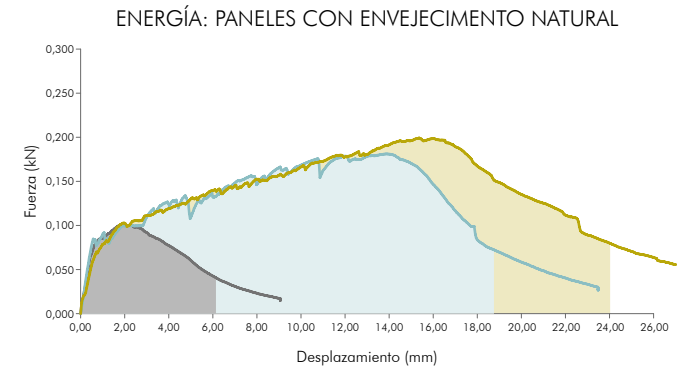
El panel gris, gracias a sus materias primas es más rígido, por tanto su MOE donde se mide mayormente el trabajo de la matriz, es más alto que en los otros paneles.

- PANEL BLANCO _ PB-01
- PANEL AMARILLO _ PA-07
- PANEL GRIS _ PG

Gráfica 96 _ Comparación de las medias de la Energía, en paneles con envejecimiento natural - color. (Fuente Propia)

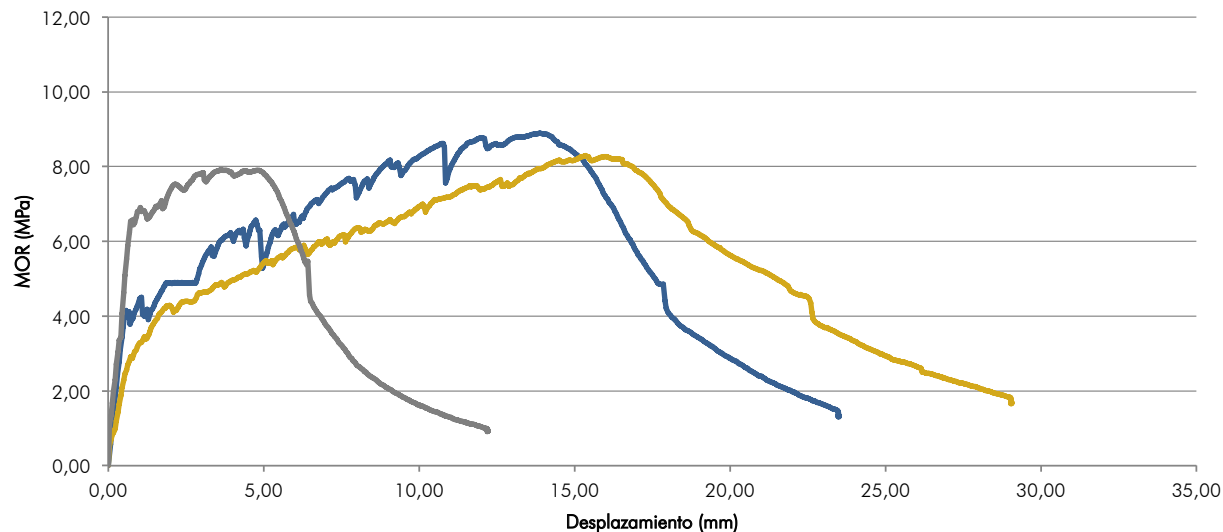
Gráfica 97 _ Comparación de las temperaturas, en paneles con envejecimiento natural - color. (Fuente Propia)

PANEL	TEMPERATURAS	
	min °C	max °C
blanco	16,7	46,5
amarillo	16,1	46,5
gris	16,6	59,2



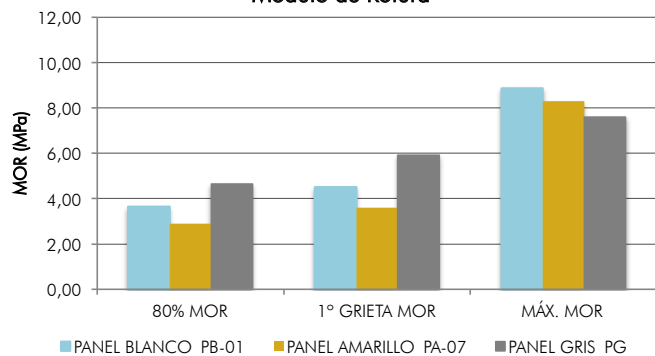
6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

E. ENVEJECIMIENTO NATURAL

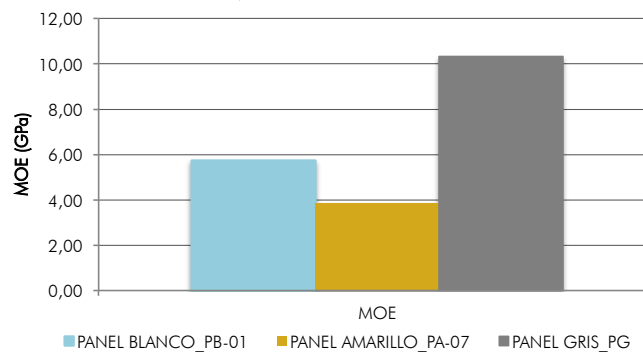


191

E. COMPARATIVO ENVEJECIMIENTO NATURAL _ Módulo de Rotura



E. COMPARATIVO ENVEJECIMIENTO NATURA _ Módulo de Elasticidad



Gráfica 93 _ Comparación de las medias del ensayo de resistencia a flexión paneles de color. (Fuente Propia)

Gráfica 94 _ Comparación de los valores del MOR, en paneles con envejecimiento natural - color. (Fuente Propia)

Gráfica 95 _ Comparación de los valores del MOE, en paneles con envejecimiento natural - color. (Fuente Propia)

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

Azul Oscuro: Fibras Sintéticas

Azul Claro: Fibras Orgánicas con Rellenos
Minerales

Rosa: Panel de Referencia para compararlo
en la Campaña Experimental.

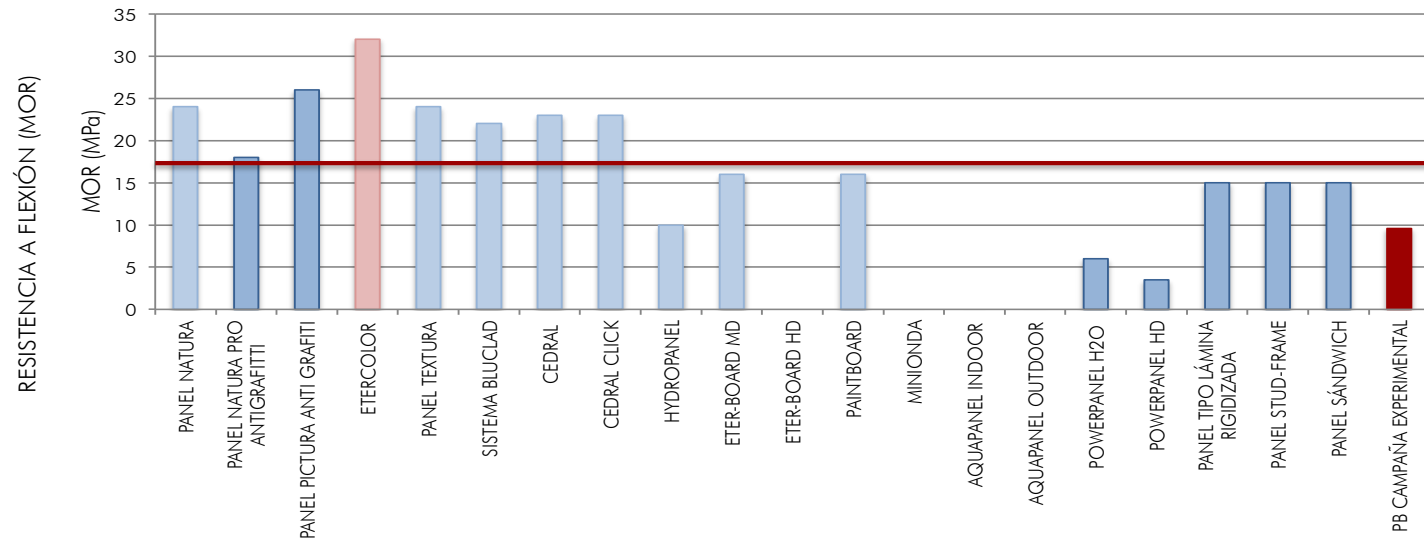
Rojo: Panel de la Campaña
Experimental

6.8 Comparación con los paneles Comerciales

Se procede a realizar una comparativa entre los MOR y MOE de los paneles de fibrocemento vistos en el Estado del Arte Industrial y los obtenidos en la Campaña Experimental. Si bien se encuentran por debajo de la media, los resultados son buenos considerando el tipo de fabricación, el tipo de fibra, la falta de fluidificante, la alta relación A/C, etc. Por otra parte,

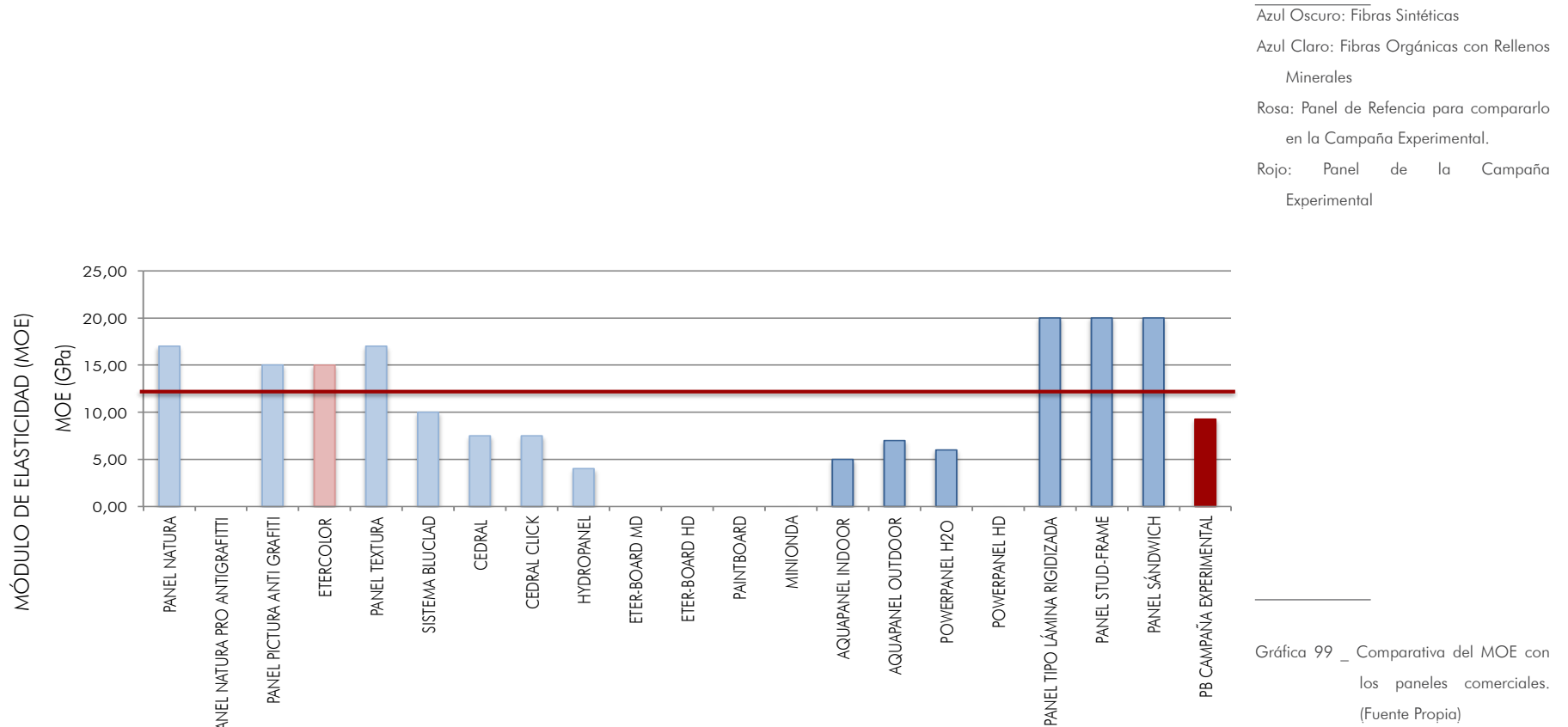
desde un punto de vista energético es mucho mejor que sus competidores.

También se realiza la comparación con un producto específico, Etercolor (uno de los paneles con mejores prestaciones), para observar sus similitudes y desigualdades, en especial de su método de fabricación y de las fibras usadas como refuerzo.



Gráfica 98 _ Comparativa del MOR con los paneles comerciales. (Fuente Propia)

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental



Gráfica 99 _ Comparativa del MOE con los paneles comerciales. (Fuente Propia)

6. Discusión de los Resultados de la Campaña Experimental

COMPARACIÓN ENTRE PANEL COMERCIAL Y PANEL DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL				
CLASIFICACIONES SEGÚN:	TIPOS	ETERCOLOR	PANEL DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	
COMPOSICIÓN DEL PRODUCTO	Empresa	Euronit	Trabajo de Fin de Máster	
	Composición Matriz	Cemento Portland. Pigmentos minerales. Aditivos funcionales	Cemento Portland Blanco (70%). Metacolin (30%) Pigmentos minerales.	
	Composición Refuerzo	Rellenos minerales. Fibras orgánicas	Textil no-tejido de Lino y Cáñamo	
MÉTODO DE PRODUCCIÓN	Tipo de Fabricación	Industrial	Manual	
	Máquina Haschek	✓	✓	
	Prensado	Doble	Simple	
	Tipo de Curado	Autoclave	Cámara de curado	
	Rectificación	Opcional	✗	
	Calibración mediante lijado	✓	✗	
	Pulido	✓	✗	
DIMENSIONES PESO Y TOLERANCIAS	Resistencia al Agua	✓	✓	
	Espesor (mm)	8mm	13mm	
	Tolerancia	Nivel I	Nivel I	
	Espesor (mm)	Cumple	No cumple.	
	Largo y ancho (mm)	±0,5	±0,96	
COLOR	Perpendicularidad (mm/m)	±3	±0,7	
	Color	1	n/a	
PROPIEDADES TÉCNICAS	Normativa	UNE EN 12467	UNE EN 12467	
	A. Evaluación según el sistema de gestión de calidad ISO			
	Densidad en Seco	1.580,00 kg/m ²	1,68 gr/cm ³	
	Resistencia a la flexión	32.00 N/mm ²	9,58 N/mm ²	
	Módulo de Elasticidad	15.000,00 N/mm ²	9.270,00 N/mm ²	
	Comportamiento hídrico 0-100%, promedio	1,60 mm/m	1,48 mm/m	
	Porosidad 0-100%	20%	18,60%	
	B. Clasificación			
	Clasificación de durabilidad	Categoría A	n/a	
	Clasificación de resistencia	Clase 4	Clase 2	
	C. Prueba tipo o estimación óptima			
	Prueba de impermeabilidad	✓	✓	
	Prueba de agua caliente	✓	n/a	
	Prueba de inmersión-secado	✓	✗	
	Prueba de hielo-deshielo	✓	n/a	

Tabla 52 _ Comparativa con el Panel

Etercolor de Euronit. (Fuente

Propia)

Resumen de la Discusión

Además de los resultados que ya se han descrito y comentado, se puede decir, que las fibras ayudan al refuerzo de matrices frágiles como la cementícea. En especial, cuando se trata de materiales de construcción de formato plano y delgado, como un panel de fachada.

Sin duda, no sólo las fibras sintéticas tienen esta potestad, las fibras vegetales constituyen una muy buena opción. Autores como Savastano, Gram entre otros, mencionan las ventajas en cuanto a costos producción y lo provechoso que este producto puede resultar para países en vías en desarrollo como es el caso de Ecuador, por lo que, continuando con el objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster, se pretende realizar ensayos que complementen la investigación con miras a una tesis Doctoral.

Se demostró que la introducción de fibras vegetales en un compuesto cementíceo, brinda ductilidad y una mayor absorción de energía del producto final. Hoy en día, esto es deseable en ciertos materiales de construcción, pues en caso de siniestro, la fibra colaborará en la resistencia, y de darse el fallo, no sólo alertará del episodio, sino también mantendrá sujetas las partes sin soltar desprendimientos que puedan ser

peligrosos para los transeúntes.

Como se mencionó en 4.1.2. Ensayo a flexión, no es posible hacer la comparación entre un VFRCC y un compuesto cementíceo no-reforzado, pues las muestras no estarían en igualdad de condiciones, debido a su distinta relación A/C, densidad y porosidad del material.

Además, en este mismo punto, se explica que donde más se puede observar el trabajo de la fibra es en la fase de post-agrietamiento.

Aunque en la Campaña Experimental se hubiese deseado llegar a un porcentaje más alto de volumen fibra incorporado (2,57%), con ella se ratifica el uso de un textil no-tejido para trabajar con fibras largas evitando que estas se enreden. Se logra una distribución más homogénea y en general se facilita la trabajabilidad del material en estado fresco. Además, permite una buena penetración de la pasta cementícea entre las fibras.

Entre las ventajas más importantes encontradas entre las fibras vegetales y las sintéticas, son: su fuente renovable y su bajo consumo energético. Características que deben ser explotadas en mira a materiales más sustentables.

Se demuestra que se pueden utilizar métodos no abrasivos, para mejorar la durabilidad de la fibra. El lavado y cornificado de los NW sin duda aumenta la adherencia fibra-matriz, por ende mejora la resistencia del compuesto, elimina las impurezas que pueda tener la fibra y que aceleren su proceso de deterioro.

A manera de conclusiones específicas, referentes a la campaña experimental, es posible plantear un panel con características similares a las de un panel comercial, tales como menor peso que un panel de mortero convencional, con impermeabilidad al agua y estabilidad dimensional. Aunque se deba seguir trabajando en su durabilidad.

Como se observó durante la campaña experimental, la durabilidad aún sigue siendo un punto por resolver. La bibliografía revisada muestra que la reducción de la alcalinidad en la matriz es una manera de evitar la degradación de la fibra, y por otro lado, el metacaolín es un material idóneo para ello. Por lo que se sugiere pruebas de análisis microestructural que determinen si el MK absorbió el hidróxido de calcio, si la presencia de la fibra influye, o encontrar otra posible causa por la el VFRCC no soporta un proceso de envejecimiento acelerado.

Las capas externas son una buena manera para trabajar con el acabado final del producto. En el caso del panel amarillo se observó una buena adherencia entre las capas (interna-externa), sin embargo para una próxima investigación, se recomienda disminuir el espesor de la capa externa, pues como se vio en el ensayo de Inmersión y Secado cuando la capa es muy gruesa puede desprenderse del compuesto.

Hoy en día según la Norma UNE EN 12467:2013, todos los paneles deben aprobar los ensayos de durabilidad entre ellos (los 25 ciclos de Inmersión y Secado, y otros) para que su Evaluación de Conformidad sea favorable, por tanto el panel no puede tener una aplicación concreta. Sin embargo cuando se logre superar este inconveniente, el panel podría ser aplicado en fachadas ventiladas, cielos rasos, tabiques interiores, tanto en revestimientos exteriores e interiores, como lo hacen los fibrocementos comerciales, reforzados con fibras de celulosa, PVA, fibra de vidrio, etc. pero con un impacto ambiental mucho menor.

Para finalizar la discusión, se debe recalcar, la importancia de trabajar en un equipo multidisciplinar, pues es muy enriquecedor que cada integrante dé su aporte desde su propia base de conocimiento.

7. Conclusiones Finales

7. Conclusiones Finales

En cuanto a la fabricación,

- El no-tejido es una buena manera de trabajar con fibras largas, sin que estas se enreden.
- El no-tejido facilita una distribución más homogénea de las fibras dentro del compuesto.
- Un tratamiento no abrasivo como el de “lavado y cornificación”, limpia al no-tejido de impurezas (resinas, etc.), facilitando el mojado de la fibra y volviéndola más estable dimensionalmente.
- No se muestra ningún inconveniente al usar pigmento en la capa externa.
- Es necesario realizar las capas externas lo más delgadas posible, caso contrario pueden desprenderse.

En cuanto a sus características físicas,

- Un panel reforzado con fibras vegetales es más liviano que un panel sin fibras.
- La incorporación de fibra vegetal en un panel cementíceo mantiene las condiciones de impermeabilidad al agua, de acuerdo a la normativa vigente.
- Los paneles cementíceos examinados, reforzados con un no-tejido de fibras vegetales, presentan una variación dimensional bastante pequeña.
- Con la exposición a la intemperie todos los paneles tienden a perder color, hacia un tonos más blancos.

En cuanto a la resistencia mecánica,

- Luego de 28 días de curado, se observa que la inserción de fibras vegetales en un compuesto cementíceo, brinda ductilidad, es decir, aumenta el módulo de rotura, la deformación de la pieza.

- El refuerzo de fibras vegetales permite que el compuesto se deforme debido aplicación de una carga y alerte de su rotura.

En cuanto a la durabilidad,

- Los 25 ciclos de Inmersión y Secado aún son muy abrasivos con el compuesto. No se logra superar una de las pruebas de durabilidad de la UNE EN 12467:2013.
- Luego del envejecimiento natural (60 días), la fibra tiene un comportamiento muy similar a la probeta sin ciclos de envejecimiento, en cuanto a MOR, deformación y energía.
- El color influye en la absorción de temperatura del panel. Esto puede generar ciclos más fuertes de envejecimiento, ocasionando resultados más bajos en los ensayos.

Finalmente, se sugiere profundizar en la investigación de la durabilidad del panel, tanto en la matriz como en la fibra. En el primer caso, se propone realizar un análisis microestructural, realizando ensayos de difracción por RX, espectrometría de absorción infrarroja, entre otros. En el caso de la fibra, caracterizarla de mejor manera, observando su comportamiento en medios alcalinos, etc.

8. Bibliografía

- 8.1. Bibliografía
 - 8.2. Bibliografía paneles comerciales
 - 8.3. Bibliografía materiales
-

8.1 Bibliografía

- [1] Agencia Pública de Noticias del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, "Ciudad Bicentenario concluirá en diciembre de 2013," Quito, Ecuador, Jun-2013.
- [2] Edición e impresión Popular S.A., "¿Quieres tu casa propia?, vivienda de interés social en la feria del BIESS 2013," Quito, Ecuador, 15-Oct-2013.
- [3] El Telegrafo, "480 casas en Ciudad Bicentenario," Quito, Ecuador, 18-Dec-2012.
- [4] EPMDUQ, "Bicentenario." [Online]. Available: http://www.epmduq.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=31%3Abicentenario&catid=1%3Acontenido&Itemid=1. [Accessed: 05-May-2014].
- [5] V. Agopyan, "Vegetable fibre reinforced building materials - developments in Brazil and other Latin American countries," in *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Vol. V, First Edit., R. N. Swamy, Ed. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd., 1988, pp. 208–242.
- [6] R. N. Swamy, "Vegetable fibre reinforced cement composites - a false dream or a potencial reality?," in *Vegetable plants and their fibres as building materials*, First edit., H. Sobral, Ed. London, etc. : Chapman and Hall, 1990, pp. 3–8.
- [7] H. Savastano Jr, "The use of coir fibres as reinforcement to Portland cement mortars," in *Vegetable plants and their fibres as building materials*, First Edit., H. Sobral, Ed. London, etc. : Chapman and Hall, 1990, pp. 150–158.
- [8] AENOR, "UNE-EN 12467:2013 Placas planas de cemento reforzado con fibras. Especificaciones del producto y métodos de ensayo.," 2013. [Online]. Available: http://www.aenor.es/aenor/normas/buscadornormas/resultadobuscnormas.asp#.U7-9311_sy4. [Accessed: 11-Jul-2014].
- [9] C. Simonnet, *Hormigón : historia de un material : economía, técnica, arquitectura*. Donostia-San Sebastián : Nerea, 2009.
- [10] M. Fernández Cánovas, *Hormigón*. Madrid : Colegio de Ingenieros Caminos Canales y Puertos. Servicio de Publicaciones, 2004.
- [11] J. Claramunt Blanes, "Utilització de fibres vegetals per a l'elaboració de morters de ciment d'altas prestacions (SHCC).," *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2011.
- [12] C. Schätzke and H. N. Schneider, "Hormigón con refuerzo textil," in *Detail Praxis - Hormigón: diseño, construcción, ejemplos*, M. Peck, Ed. Barcelona : Gustavo Gili, 2007, pp. 32 – 37.
- [13] "Pantheon.drawing - Panteón (arquitectura) - Wikipedia, la enciclopedia libre." [Online]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Panteón_\(arquitectura\)#mediaviewer/File:Pantheon.drawing.jpg](http://es.wikipedia.org/wiki/Panteón_(arquitectura)#mediaviewer/File:Pantheon.drawing.jpg). [Accessed: 17-Oct-2014].
- [14] S. Louvet, "Prototipo de barca flotante en ferrocemento de Josep Lambot," Ciudad de Brignoles - Museo. [Online]. Available: <http://www.brignoles.fr/en-images/album-photo-403/musee-99.html?cHash=7fac1529ce69e6412378c7c46a0e74df>. [Accessed: 12-Nov-2014].
- [15] K. Powell, *Los Grandes arquitectos*. Barcelona : Lunweg, 2012.
- [16] M. Peck, "Nociones básicas sobre la tecnología del hormigón," in *Detail Praxis - Hormigón: diseño, construcción, ejemplos*, M. Peck, Ed. Barcelona : Gustavo Gili, 2007, pp. 10 –25.
- [17] D. Bennett, *Innovations in concrete*. London : Thomas Telford, 2002.
- [18] C. Hornbostel, *Materiales para construcción : tipos, usos y aplicaciones*. Noriega Editores.; Limusa ;, 1999.
- [19] Espanya.Ministerio de Fomento, EHE-08 : instrucción de Hormigón Estructural : con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón : EHE-08. Madrid : Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, 2009.
- [20] J. R. Krause, *Fibre cement : technology and design*. Basel [etc.] : Birkhäuser, 2007.
- [21] E. Neufert and P. von Flotow, *Manual del amianto-cemento : placas onduladas Eternit-Uralita*. Barcelona : Gustavo Gili, 1967.
- [22] R. Huete Fuertes and M. C. González Kunz, "Análisis de efectos y limitaciones en el uso y manipulación del fibrocemento," in *Aplicaciones arquitectónicas de materiales : VII jornada : Madrid 19 de mayo 2003*, 2003.
- [23] "AMIANTO2 - FUTSAL - Especialistas en Sellos de Goma, Marcaje Industrial, Rotulación, Serigrafía y Señalización." [Online]. Available: <http://www.futsalactivities.com/es/default>.

8.1 Bibliografía

- [24] D. O. de las C. Europeas, "DIRECTIVA 1999/77/CE DE LA COMISIÓN de 26 de julio de 1999," 06/08/1999, Bruselas, Aug-1999.
- [25] Z. Fördös, "Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites," in *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Vol. V, First Edit., R. N. Swamy, Ed. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd., 1988, pp. 173–207.
- [26] H.-E. Gram, "Natural fibre concrete roofing," in *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Vol. V, First Edit., R. N. Swamy, Ed. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd., 1988, pp. 256–285.
- [27] "Bareque: Técnicas Constructivas de Cerramiento." [Online]. Available: <http://barequeconstrucciones.blogspot.com.es/2012/08/tecnicas-constructivas-de-cerramiento.html>. [Accessed: 13-Aug-2014].
- [28] C. Aguedo, Stanley; Baillie, "ICE manual of construction materials," in *ICE manual of construction materials*. Vol. II, Second Edi., M. Forde, Ed. London : Thomas Telford, 2009, pp. 861–871.
- [29] V. Agopyan, H. Savastano, V. M. John, and M. A. Cincotto, "Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 527–536, May 2005.
- [30] C. Broto and M. Camacho, *Arquitectura y construcción : español, english, français, Deutsch*. Sant Adrià del Besòs : Instituto Monsa de Ediciones, 2001.
- [31] J. Claramunt, M. Ardanuy, J. A. García-Hortal, and R. D. T. Filho, "The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 586–595, May 2011.
- [32] D. Pellicer Daviña and C. Sanz Larrea, *El Hormigón armado en la construcción arquitectónica*. Madrid : Bellisco, 2010.
- [33] AENOR, "Norma UNE-EN 197-1:2011 Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.," 2011. [Online]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0048623&PDF=Si#.VD-WKtSsUy5>. [Accessed: 16-Oct-2014].
- [34] S. D. S. Guimarães, "Vegetable fibre-cement composite," in *Vegetable plants and their fibres as building materials*, First Edit., H. Sobral, Ed. London, etc. : Chapman and Hall, 1990, p. 98–.
- [35] H.-E. Gram, "Durability of natural fibres in concrete," in *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Vol. V, First Edit., R. N. Swamy, Ed. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd., 1988, pp. 143–172.
- [36] S. S. Rehsi, "Use of natural fibre concrete in India," in *Natural fibre reinforced cement and concrete*. Vol. V, First Edit., vol. 5, R. N. Swamy, Ed. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd., 1988, pp. 243–255.
- [37] C. Reyes Nájera, "Estudio del comportamiento de morteros reforzados con fibras de maíz, para componentes de viviendas de bajo coste," *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2009.
- [38] V. M. John, V. Agopyan, and A. Derolle, "Durability of blast furnace-slag-based cement mortar reinforced with coir fibres," in *Vegetable plants and their fibres as building materials*, First edit., H. Sobral, Ed. London, etc. : Chapman and Hall, 1990, pp. 87–97.
- [39] J. Claramunt Blanes, H. Ventura Casellas, F. Parés Sabatés, and M. Ardanuy Raso, "Estructuras no tejidas de fibras naturales como refuerzo para compuestos de cemento de elevada ductilidad," Nov. 2013.
- [40] I. Merta and E. K. Tschegg, "Fracture energy of natural fibre reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 991–997, Mar. 2013.
- [41] M. F. Canovas, G. M. Kawiche, and N. H. Selva, "Possible ways of preventing deterioration of vegetable fibres in cement mortars," in *Vegetable plants and their fibres as building materials*, First Edit., H. Sobral, Ed. London, etc. : Chapman and Hall, 1990, pp. 120–129.
- [42] F. M. M.D. Salvador¹, V. Amigó¹, A. Nuez¹, O. Sahuquillo¹, R. Llorens², "Caracterización de Fibras Vegetales Utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas."
- [43] B. Chatveera and P. Nimityongskul, "Mechanical properties of sisal fibre-mortar composites containing rice husk ash," in *Fibre reinforced cement and concrete : proceedings of the Fourth International Symposium held by RILEM (the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) : Sheffield, July 20-23, 1992*, R. N. Swamy, Ed. London [etc.] : E & FN Spon, 1992, pp. 1056–1072.

8.1 Bibliografía

- [44] M. J. E. Olivera and V. Agopyan, "Effect of Simple treatments on malva fibres for the reinforcement of Portland cement mortar," in *Fibre reinforced cement and concrete : proceedings of the Fourth International Symposium held by RILEM (the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) : Sheffield, July 20-23, 1992*, R. N. Swamy, Ed. London [etc.] :, 1992, pp. 1073–1079.
- [45] Euronit, "Hydropanel." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/tabiqueria-seca/hydropanel>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- [46] I. de C. de la C. E. Torroja, "DIT." [Online]. Available: <http://www.ietcc.csic.es/index.php/es/apoyo-tecnologico/evaluacion-tecnica-de-productos-innovadores/documentos/dit>. [Accessed: 23-Nov-2014].
- [47] "UNE 88412:2006 Productos de fibrocemento NT (sin amianto). Directrices para su corte y mecanizado en obra." [Online]. Available: http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0035467&PDF=Si#.U8U_EY1_sy4. [Accessed: 15-Jul-2014].
- [48] A. . D. C. Filho, "Mortar reinforced with sisal-mechanical behavior in flexure," in *Vegetable plants and their fibres as building materials*, H. S. Sobral, Ed. London, etc. : Chapman and Hall, 1990, pp. 130–138.
- [49] "The determinarion of energy absortion in flexure of thin fibre reinforced cement sections," *Mater. Struct.*, vol. 17, no. No. 102, pp. 171–173, 1984.
- [50] A. Dolz Blasco, "Hormigones con cemento blanco," in *Estudios avanzados sobre cementos, morteros y hormigones : XVII Curso de Estudios Mayores de la Construcción : nuevas tendencias de la construcción : la innovación en las técnicas, los sistemas y los materiales de construcción*, M. T. Blanco Varela and F. Puertas Maroto, Eds. Madrid : IETcc, 2007, pp. 197–212.
- [51] Lafarge, "Cemento Blanco." [Online]. Available: http://www.lafarge.com.es/wps/portal/es/2_3_4-Blancos. [Accessed: 29-Oct-2014].
- [52] J. C. R. GUTIÉRREZ, O. J. R. BAENA, and J. I. TOBÓN, "Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland," *Dyna*, vol. 73, no. 150, pp. 131–141, 2006.
- [53] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Appl. Clay Sci.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, Mar. 2009.
- [54] J. P. Gonçalves, L. M. Tavares, R. D. Toledo Filho, and E. M. R. Fairbairn, "Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1971–1979, May 2009.
- [55] S. A.-A. Arcillas Refractarias, "Metacaolín Peser." [Online]. Available: <http://www.arciresa.es/metacaolines.html>. [Accessed: 14-Jul-2014].
- [56] S. S.A.U., "Producción de Hormigón y Mortero." [Online]. Available: http://esp.sika.com/es/solutions_products/document_download/productos-construccion-2014/hojas-datos-producto/familias-hojas-datos/productos-produccion-hormigon-mortero.html. [Accessed: 13-Jun-2014].
- [57] "INDA | Leading Global Trade Association of the Nonwovens Industry." [Online]. Available: <http://www.inda.org/>. [Accessed: 19-Nov-2014].
- [58] *Diccionario de la lengua española*. Madrid : [Espasa-Calpe], 1992.
- [59] "Castroquilame: mayo 2013." [Online]. Available: http://castroquilame.blogspot.com.es/2013_05_01_archive.html. [Accessed: 08-Oct-2014].
- [60] S. Ciments, "Pigmento Amarillo 13." [Online]. Available: <http://www.serraciments.com/>. [Accessed: 30-Apr-2014].
- [61] J. M. Illston, *Construction materials : their nature and behaviour*. London [etc.] : E, 1994.
- [62] ASTM, "Stardard Practice for Maintaining Constan Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions." .
- [63] G. Calle and E. Henao, "Dureza Vickers." [Online]. Available: <http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAVICKERS.pdf>. [Accessed: 27-Nov-2014].
- [64] "Fibras y Materiales de Refuerzo." [Online]. Available: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/OCT11/garcia.pdf>. [Accessed: 10-May-2014].
- [65] J. E. Robledo Castillo, *Un siglo de bahareque en el antiguo Caldas*. Bogotá: El Ancora Editores, 1993.
- [66] P. J. Ramírez Sendoya, *Diccionario Indio del Gran Tolima*. Editorial Minerva LTDA, 1952.
- [67] "Orgánico - Wikipedia, la enciclopedia libre." [Online]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Orgánico>. [Accessed: 02-Oct-2014].
- [68] "Compuesto inorgánico - Wikipedia, la enciclopedia libre." [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Compuesto_inorgánico. [Accessed: 02-Oct-2014].

8.1 Bibliografía

[69] “Elemento sintético - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Elemento_sintético. [Accessed: 02-Oct-2014].

[70] M. A. Sabanés Hernández, “Uso de no tejidos de fibras vegetales en matrices de cemento para materiales de construcción.” Universitat Politècnica de Catalunya, 28-Nov-2013.



8.2 Bibliografía de Paneles Comerciales

- M-[1] Euronit, "Panel Natura." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/hd/natura>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [2] Euronit, "Panel Natura Pro." [Online]. Available: http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/hd/natura_pro. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [3] Euronit, "Panel Pictura." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/hd/pictura>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [4] Euronit, "Panel Eter-Color." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/hd/etercolor>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [5] Euronit, "Panel Textura." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/hd/textura>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [6] Euronit, "Panel Bluclad." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/bluclad>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [7] Euronit, "Sistema Cedral." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/fachadas-ventiladas/cedral>. [Accessed: 21-Nov-2014].
- M- [8] Euronit, "Hydropanel." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/tabiqueria-seca/hydropanel>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [9] Euronit, "Eter-Board MD." [Online]. Available: http://www.euronit.es/sistemas/construccion-seca/otros/eterboard_md. [Accessed: 17-Nov-2014].
- M- [10] Euronit, "Eter-Board HD." [Online]. Available: http://www.euronit.es/sistemas/construccion-seca/otros/eterboard_hd. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [11] Euronit, "Minionda." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/construccion-seca/otros/minionda>. [Accessed: 17-Nov-2014].
- M- [12] Euronit, "Paintboard." [Online]. Available: <http://www.euronit.es/sistemas/construccion-seca/otros/paintboard>. [Accessed: 17-Nov-2014].
- M- [13] Knauf, "Aquapanel Indoor." [Online]. Available: <http://www.knauf.es/index.php/es/productosknauf/placas-knauf/placaaquapanelindoor>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [14] Knauf, "Aquapanel Outdoor," 2008. [Online]. Available: <http://www.knauf.es/index.php/es/productosknauf/placas-knauf/aquapanel-outdoor>. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [15] Fermacell, "Powerpanel H2O." [Online]. Available: http://www.fermacell.es/es/content/paneles_powerpanel_h2o_1616.php. [Accessed: 04-Jul-2014].

- M- [16] Fermacell, "Powepanel HD." [Online]. Available: http://www.fermacell.es/es/content/paneles_powerpanel_hd_1615.php. [Accessed: 04-Jul-2014].
- M- [17] H. Formula, "Hormigón GRC – Paneles GRC hormigón interiorismo - Fachada ventilada." [Online]. Available: <http://www.panelesgrc.com/index.php/es>. [Accessed: 15-Nov-2014].