

PROPUESTA DE PANEL DE YESO ALIGERADO PARA TECHO SUSPENDIDO CONTINUO CON ADICIÓN DE HILOS DE POLIETILENO DE TEREFTALATO PROCEDENTE DE BALONES DEPORTIVOS

TRABAJO FIN DE GRADO

· ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE SEVILLA

· CURSO 2022/23

Realizado por CLARA ADASSUS SÁNCHEZ

Equipo docente: Antonio Domínguez Delgado · Diego César Frustaglia · Paloma Rubio de Hita

Tutor: Antonio Domínguez Delgado

AGRADECIMIENTOS

Agradecer, en primer lugar, por todo el tiempo dedicado, a mi tutor, Antonio Domínguez Delgado y al equipo docente del grupo TFG-H, Paloma Rubio de Hita y Diego César Frutaglia, por guiarme en la investigación.

Agradecer, por otro lado, a mis compañeros de trabajo en equipo, Marta Hernani Álvarez
y Miguel Guerrero López-Palanco,

A mi familia y amigos, por el apoyo incondicional.

ÍNDICE

00.	PRÓLOGO.....	07
00.1.	Resumen. Palabras clave.	
00.2.	Abstract. Key words.	
01.	INTRODUCCIÓN.....	09
01.1.	¿Qué son los plásticos? ¿Cómo se fabrican?	
01.2.	Tipos de plásticos.	
01.2.1.	Polietileno de Tereftalato	
01.3.	El problema de los plásticos y el medio ambiente. El reciclaje como solución.	
02.	ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	13
02.1.	Origen y usos de los balones.	
02.2.	Producción, composición y consumo de balones.	
02.3.	Problemas ambientales de los balones.	
02.4.	En el sector de la construcción.	
02.5.	Estudios de referencia.	
03.	OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	21
03.1.	Objetivos generales.	
03.2.	Objetivos específicos.	
04.	HIPÓTESIS DE PARTIDA.....	22

23.....	METODOLOGÍA DE TRABAJO	05.
24.....	EXPERIMENTACIÓN	06.
	Ensayo mecánico	06.1.
	Introducción a la metodología y normativa de aplicación	06.1.1.
	Elaboración y dosificación de probetas	06.1.2.
	Metodología del ensayo	06.1.3.
	Análisis de los resultados	06.1.4.
	Conclusiones del ensayo	06.1.5.
40.....	PROPUESTA Y DISEÑO DE PRODUCTO	07.
	Conclusiones de la comparativa	07.1.
47.....	APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO	08.
	Impacto medioambiental de la propuesta	08.2.
52.....	CONCLUSIONES	09.
53.....	BIBLIOGRAFÍA	10.
56.....	ANEXO	11.

*Este trabajo es de carácter individual, no obstante, la parte de investigación, desde el apartado 1. *Introducción* hasta el apartado 6.1.3. *Análisis de los resultados*, ha sido elaborado junto a mis compañeros Marta Hernani Álvarez y Miguel Guerrero López-Palanco.

oo.PRÓLOGO

oo. PRÓLOGO

oo.1. Resumen. Palabras clave.

El elevado consumo de materiales plásticos, en grave aumento durante los últimos años, genera un impacto ambiental devastador. La producción masiva y el no reciclaje de los plásticos han llevado a la acumulación de toneladas de residuos plásticos en nuestros océanos, suelos y ecosistemas, tardando cientos de años en degradarse, liberando toxinas y dañando la vida marina y terrestre.

Una de las muchas industrias responsables de ello es el sector de la construcción y edificación. Es por ello que el presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo aportar una solución ecoeficiente como alternativa a un producto comercial de gran impacto -en este caso los sistemas de techos suspendidos con placas de yeso laminado aditivadas con fibra de vidrio y aligerante- sustituyendo los añadidos nocivos para el medioambiente por un material plástico reciclable.

Se analizarán las propiedades de la propuesta y se concluirá con su aplicación a un caso práctico, realizando las comprobaciones necesarias para el cumplimiento de los estándares técnicos.

Residuos plásticos · Reciclaje · Vida útil · Consumo · Materiales compuestos · Balones deportivos
Polietileno Tereftalato · Yeso · Techo suspendido

00.2. Abstract. Key words.

The high consumption of plastic materials, which has been increasing sharply in recent years, has a devastating environmental impact. The mass production and non-recycling of plastics has led to the accumulation of tons of plastic waste in our oceans, soils and ecosystems, taking hundreds of years to degrade, releasing toxins and damaging marine and terrestrial life.

One of the many industries responsible for this is the building and construction sector. That is why this Final Degree Project aims to provide an eco-efficient solution as an alternative to a high-impact commercial product - in this case, suspended ceiling systems with laminated plasterboards additive with fibreglass and lightener - by replacing the environmentally harmful additives with a recyclable plastic material.

The properties of the proposal will be analysed and will conclude with its application to a practical case, carrying out the necessary checks to ensure compliance with technical standards.

Plastic waste · Recycling · Life cycle · Consumption · Composite materials · Sports balls ·
Polyethylene Terephthalate · Gypsum · Suspended ceiling

01. INTRODUCCIÓN

01. INTRODUCCIÓN.

01.1. ¿Qué son los plásticos? ¿Cómo se fabrican?

El plástico es considerado un compuesto sintético derivado de un material polimérico orgánico, compuesto por moléculas orgánicas gigantes. La gran mayoría de los plásticos son obtenidos a partir del petróleo, lo que conlleva a un gran contenido de aditivos químicos que se pueden atribuir para obtener el objeto u material deseado. Por otro lado, también existen los plásticos naturales, en una proporción menor muy considerable, cuya ventaja es que son biodegradables y no dañan de forma tan agresiva el medio ambiente. Según un estudio de *Plastics Europe* sobre la producción global de plásticos, el 90,2% de la era de origen fósil. Mientras que los plásticos reciclados y los bioplásticos representan la gran minoría. [Gráfica 1]

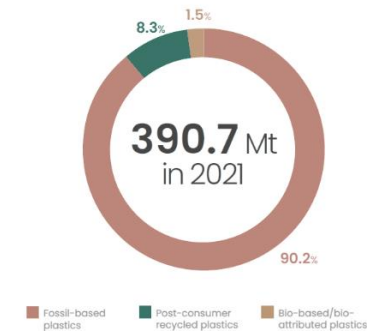
El plástico es un elemento que se ha hecho dueño de nuestra vida cotidiana, se ha apoderado de nuestros usos y actividades y se ha infiltrado en la industria siendo finalmente un elemento indispensable. Los plásticos nos permiten satisfacer un sinnúmero de exigencias funcionales y estéticas, desde beber agua limpia, hacer deporte, comer alimentos frescos, utilizar tecnología, etc... Los productos y piezas de plástico utilizan aplicaciones, como envases, construcción, productos eléctricos, agricultura, ocio y deporte y muchas otras.

En la siguiente gráfica [Gráfica 2] observamos como la producción mundial de plásticos ha evolucionado durante los últimos cuatro años, desde 2017 hasta 2021, manteniéndose estanca en el continente americano, presentando una pequeña disminución tanto en la Unión Europea como en Japón, y aumentado en Asia. Destacamos la cifra de 390,7 millones de toneladas de producción mundial de plásticos en el pasado años 2021, siendo un tercio de esta producción procedente de China.

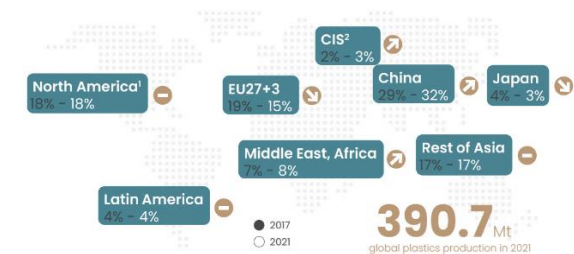
La fabricación del plástico debe pasar por cuatro fases básicas para llegar a la obtención del producto:

- 1- Obtención de las materias primas como carbón, petróleo o gas natural.
- 2- Síntesis del polímero básico, proceso de filtración y refinación, obtendremos monómeros.
- 3- Obtención del polímero como un producto utilizable industrialmente
- 4- Composición, moldeo o deformación del plástico hasta su forma definitiva.

El primer paso en la fabricación de plástico es la polimerización. Estos métodos se pueden realizar de varias maneras. En la polimerización en masa, solo se polimerizan los monómeros, generalmente en fase gaseosa o líquida. La polimerización en disolución forma una emulsión, que posteriormente se coagula. En la polimerización interfacial, los monómeros se disuelven en dos líquidos inmiscibles y la polimerización se produce en la interfaz entre los dos líquidos. Los aditivos químicos se utilizan a menudo para lograr ciertas propiedades. Muchos otros plásticos se fabrican en forma de compuestos, lo que implica agregar algún refuerzo a la matriz de resina plástica.



Gráfica 1. Producción mundial de plásticos en 2021. Fuentes: Conversio Market & Strategy GmbH y nova-Institute.



Gráfica 1. Distribución de la producción mundial de plásticos. Fuentes: Conversio Market & Strategy GmbH y nova-Institute.

01.2. Tipos de plásticos.

Hay muchos tipos diferentes de plástico, y se pueden agrupar en dos familias de polímeros; los termoplásticos, que se ablandan con el calor y se endurecen cuando se enfrían, y los termoestables, que nunca se ablandan una vez moldeados.

El polímero termoplástico se moldea para darle una forma específica diferente según el diseño del molde. Por lo tanto, es reversible y puede reciclarse y moldearse con formas diferentes conservando las propiedades del material. Los más comunes son el polipropileno (PP), el polietileno (PE), nailon, ácido poliláctico (PLA), poliestireno, cloruro de polivinilo (PVC) y el tereftalato de polietileno (PET).

Los plásticos termoestables tienen unas propiedades iniciales del material que comienzan a variar consiguiendo mayor estabilidad y resistencia a altas temperaturas. Esto supone una mejora en las propiedades mecánicas, sobre todo se contempla una mayor resistencia a la deformación. Sin embargo, el gran problema de estos plásticos es su dificultad a la hora de reciclar, lo que acaba provocando un gran impacto medioambiental.

Polímeros Termoplásticos	Polímeros Termoestables
Con el calor se ablandan, con el frío se endurecen	Pueden resistir temperaturas elevadas
Se pueden calentar y moldear múltiples ocasiones	Se calientan y moldean una única vez
Se estabiliza en 10 segundos	Puede llevar hasta 5 minutos la estabilización
Solubles en determinados disolventes orgánicos	Insolubles
Fácil procesado	Elevada resistencia térmica

Es importante explicar la diferencia entre residuos plásticos posconsumo y preconsumo. Los residuos de plástico preconsumo proceden de los procesos de producción y transformación de plásticos (por ejemplo, producción defectuosa y bebederos, secciones de bordes de láminas de plástico, restos de producción). Los residuos de plástico preconsumo excluyen los materiales de reelaboración, como el triturado o la chatarra, generados y recuperados en el mismo proceso de fabricación. Los residuos de plástico posconsumo se refieren a productos de plástico (envases de plástico, marcos de ventanas viejos, aparatos electrónicos usados, etc.) que son desechados por los consumidores finales una vez que han cumplido su función y ya no pueden utilizarse.

01. INTRODUCCIÓN

01.3. El problema de los plásticos y el medio ambiente. El reciclaje como solución.

Los residuos plásticos generados globalmente y su contaminación asociada se están extendiendo en los ecosistemas marinos y terrestres, teniendo consecuencias graves en el medio ambiente y en la salud humana. La contaminación por plásticos marinos y el cambio climático asociado contribuyen al calentamiento global y al aumento de la temperatura oceánica, repercutiendo en la biodiversidad de especies y en el ecosistema. Estos plásticos suponen una continua liberación de gases tóxicos que va aumentando a medida que el plástico se va degradando cada vez más hasta convertirse en micro plásticos que van siendo ingeridos por animales hasta causar su muerte.

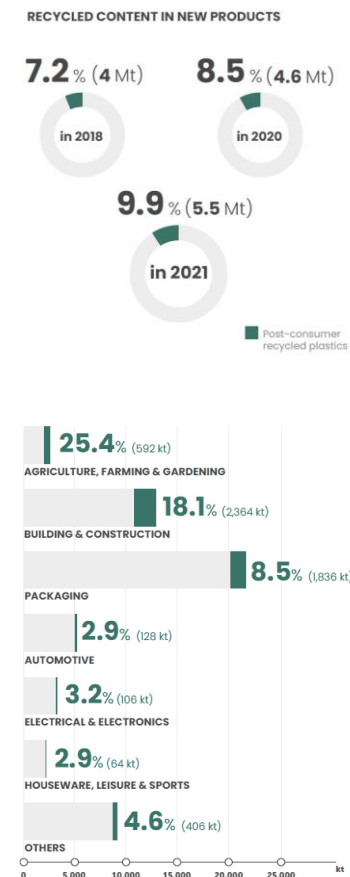
Este impacto del cambio climático en las especies puede propagarse a lo largo de la cadena alimentaria y afectar a los organismos de niveles tropicales superiores. En el sistema terrestre, el ecosistema del suelo desempeña un papel crucial en el mantenimiento de los ciclos de nutrientes y constituye la plataforma para la producción de alimentos y piensos. Los ecosistemas del suelo reciben mucha cantidad de residuos plásticos que ocasiona una alteración de los parámetros básicos del suelo y provoca emisiones de N₂O y CO₂ que reducen la fertilidad del suelo, por lo que el ecosistema terrestre tiene un fuerte impacto en el perfil de la población y faunas microbianas.

En los ecosistemas marinos, la persistencia de los micro plásticos es una gran amenaza para la biota marina y el aumento sustancial de los niveles de micro plásticos y nano plásticos se han reportado en especies pelágicas, especies que viven en aguas medias o cerca de la superficie, lo que puede causar cambios genéticos en las especies y peligros de extinción.

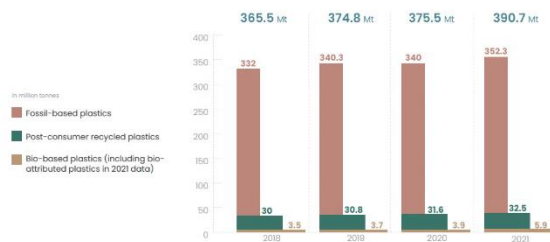
En la atmósfera, la presencia de fragmentos de plástico provoca la obstaculización y la disminución de la tasa de polinización. La polinización de plantas y cultivos por insectos sustenta un ecosistema diverso y saludable, y también genera beneficios económicos. Sin embargo, la polinización por insectos ha ido disminuyendo en el último siglo debido a una combinación de factores ambientales, incluyendo el aumento de los niveles de contaminación del aire.

La toxicidad de los plásticos para los animales marinos y la salud humana van generando cada vez una mayor preocupación ya que acaban afectando a la cadena alimentaria.

En el siguiente gráfico [Gráfica 3] podemos observar, por una parte, la evolución en los últimos años del uso de plásticos reciclados para la creación de nuevos productos, que se ha visto incrementado en un 2,7% en los últimos tres años. Y, por otro lado, el porcentaje de plásticos reciclados en comparación con el total de plásticos utilizado, que ha sido aprovechada en cada una de las industrias más contaminantes. Observamos como en el ámbito de la agricultura, ganadería y jardinería es en el que más reciclaje se ha utilizado, seguido del ámbito de la edificación y la construcción, que es el que más plástico involucra en su actividad.



Gráfica 3. Uso de plástico reciclado en las diferentes industrias. Fuente: Conversio Market & Strategy GmbH a partir de entrevistas con transformadores europeos de plásticos.



Gráfica 4. Producción mundial de plásticos. Fuentes: Conversio Market & Strategy GmbH y nova-Institute.

Como dato a destacar, en la siguiente gráfica [Gráfica 4] observamos que debido al estancamiento producido por la pandemia de COVID-19, también se produjo un descenso de la producción de plástico de origen fósil durante el año 2020. Posteriormente, esta producción volvió a verse aumentada en el año 2021, hasta llegar a la cantidad de 390,7 millones de toneladas de producción de plásticos, anteriormente mencionada en el apartado 01.1.

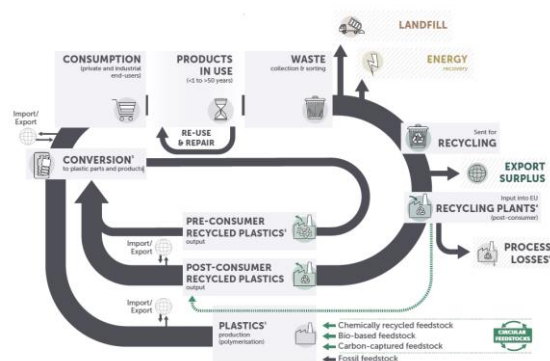
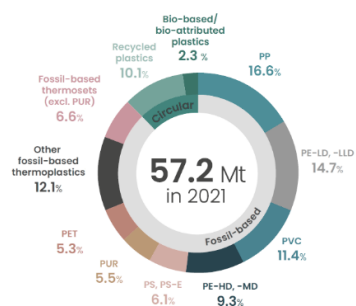


Figura 1. Economía circular. Fuente: Plastics Europe.

En la actualidad, la mayoría de los plásticos se siguen produciendo a partir de materias primas fósiles. Pero gracias a la economía circular y climáticamente neutra de los plásticos [Figura 1], existe un sistema en el que éstos se producen, transforman y reutilizan, ya que son fundamentales para ofrecer las soluciones sostenibles que actualmente valora la sociedad, pues desempeñan un papel clave en el camino hacia un futuro sostenible y neutro para el clima, por ejemplo, en los coches eléctricos, las centrales eólicas y los hogares energéticamente eficientes, ámbito sobre el que trabajaremos en este trabajo.



Gráfica 5. Producción europea de los diferentes tipos de plásticos

La transición a una economía circular y climáticamente neutra exige inversión e innovación por parte de la cadena de valor de los plásticos para desarrollar nuevos modelos de negocio de reutilización, producir más plásticos reciclados y nuevas materias primas que dependan menos del petróleo y del gas de origen fósil. En 2021, solo un 9,8% de la producción mundial de plásticos, y un 12,4% de la producción europea de plásticos, se realizó a través de esa economía circular. [Gráfica 5]

Para acelerar el avance hacia la neutralidad climática y la economía circular, los fabricantes de plásticos deben ser pioneros en la producción acelerada de plásticos reciclados y en el desarrollo de nuevas materias primas que dependan menos del petróleo y el gas de origen fósil. Sin embargo, estos cambios no pueden producirse sin el apoyo político y normativo necesario. Es por ello por lo que el objetivo de este trabajo es buscar otra alternativa, el reciclaje de un producto específico utilizado mundialmente y dar cabida a nuevos productos, en este caso en el sector de la construcción. El rápido crecimiento de la industria de la construcción y los consiguientes problemas medioambientales debidos a una gestión inadecuada de los residuos conducen a la formación de nuevos materiales de construcción a partir de desechos y sus residuos.

02. ESTADO DE LA CUESTIÓN

02. ESTADO DE LA CUESTIÓN.

02.1. Origen y usos de los balones.

Los balones son unos de los recursos más utilizados para su implementación en actividades deportivas. En consecuencia, se producen en grandes cantidades y con una gran variedad de formas, tamaños y compuestos diferentes. Se define como balón en la primera acepción, según la RAE “*Pelota grande llena de aire que se utiliza para jugar o para practicar determinados deportes*”.

Desde la infancia, los balones (sobre todo los de fútbol) han sido un elemento indispensable en los juegos, estando presentes tanto en el patio del colegio como en la calle. Balones deseados por gran parte de la población, y un objeto que no ha dejado de evolucionar ni de estar de moda. No sólo han sido utilizados en este ámbito de ocio, sino que en el mundo profesional del deporte tiene un gran peso. Se emplean también tanto para sesiones de entrenamiento y actividades complementarias como para trabajos profesionales.

En nuestro caso para sintetizar y facilitar su estudio, emplearemos balones de fútbol fabricados en la actualidad. Ya que, según el medio de recursos geográficos “Word Atlas”, el fútbol es el deporte más influyente en la actualidad, por lo que se entiende que cualquier avance que se realice con relación a esta materia tendrá un gran alcance y continuidad. En consecuencia, es posible que existan ya bases y estudios previos que ayuden a desarrollar la investigación.

A lo largo de su historia, los balones han evolucionado. Hace más de tres mil años, los mayas, en su juego de pelota, utilizaban una hecha con savia del árbol del hule. No fue hasta finales del siglo XIX cuando ya empezamos a ver balones de fútbol en un estilo más parecido a lo que tenemos en mente. En 1885, Goodyear creó un primer balón deportivo con caucho vulcanizado y una forma algo más “esférica”. Pasada esta época, y ya a finales del siglo XIX se establecen medidas y detalles técnicos a los balones de fútbol; debían tener forma esférica, un diámetro entre 21.65 y 22.29 cm, un peso entre 368 y 425 gramos, y su presión de inflado debía ser de entre 1,6 a 2,1 atmósferas. Desde entonces, el balón ha evolucionado a través de las copas mundiales de fútbol, en la forma y los colores, así como en su construcción y materiales. Su evolución, es que cada vez sea más redondo para que tenga un rebote regular y sea más manejable por los jugadores.

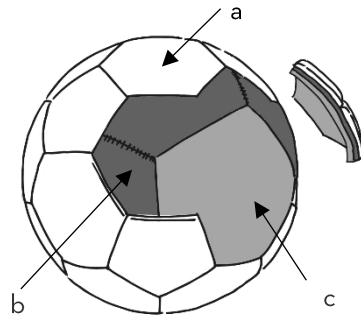


Imagen 1: Composición balón de fútbol estándar. Fuente: elaboración propia.

O2.2. Producción, composición y consumo de balones.

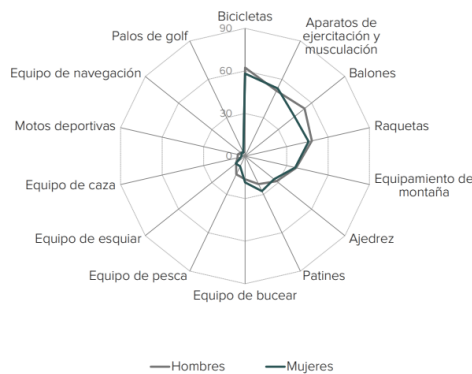
Los balones de fútbol están, en su mayoría, elaborados tanto con materiales naturales como con materiales artificiales, entre los que se incluyen diferentes tipos de plástico, así como caucho, sintético o derivado de plantas, algodón y productos de origen natural como el cuero. Estos materiales deben ser procesados en fábricas antes de conformar las capas de un balón.

La gran mayoría de los balones se producen en países subdesarrollados como Paquistán donde se complica aún más la trazabilidad del origen de los materiales empleados en su fabricación.

La industria del fútbol y su influencia ha llevado a complejizar cada vez más la composición de los balones. Lo observamos en la información que podemos obtener en los distintos productores de estos, como son Puma, Nike, Adidas e incluso Decathlon. En sus respectivas publicidades y cuando investigamos sobre sus componentes su principal objetivo es hacerlos más resistentes y cómodos al tacto con el pie.

Principalmente, todos los balones de fútbol están formados por tres capas principales, como son; la carcasa, cuyos componentes se enrollan para elaborar un exterior liso y fuerte, posteriormente sus paneles se pegan o cosen entre sí, la capa interna, que aporta forma y durabilidad, pegada a la carcasa, y, por último, una cámara de que mantiene la pelota inflada.

En nuestro caso de estudio, hemos escogido balones estándar cuya composición está formada por tres tipos de materiales [Imagen 1]. La carcasa (a), está formada por una espuma de poliuretano 100%, adherida a una fina capa de etileno acetato de vinilo, que es el material en contacto con el exterior. La capa interna (b) está formada por hilos de urdimbre de polietileno tereftalato (PET). Y, por último, la válvula de aire (c) es de caucho de butadieno (BR).



Gráfica 7. Personas que disponen de equipamiento deportivo en el hogar. Fuente: MCUD. Encuesta de Hábitos Deportivos en España

La pandemia del COVID-19, por otro lado, también provocó en 2020 un significativo aumento de prácticas deportivas que podían realizarse dentro de la propia vivienda, evitando el contacto exterior. Sin embargo, esto no quiere decir que el empleo de balones ya sea casi inexistente, en este gráfico podemos ver cómo sigue siendo uno de los elementos deportivos más empleados por los individuos. [Gráfica 7]

02.3. Problemas ambientales de los balones.

En general los materiales con muchas composiciones, como es el caso de los balones, suponen un gran problema para el ecosistema ya que la separación y la reutilización de sus materiales supone un mayor coste económico que la propia extracción y la producción de sus distintas materias primas por separado.

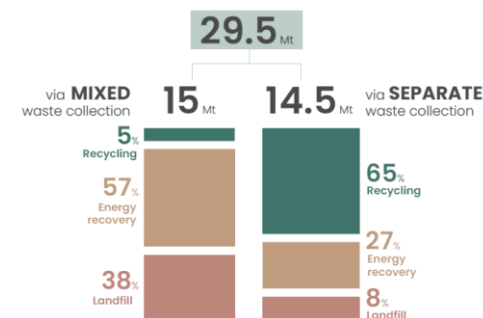
Aunque la fabricación de productos más resistentes es favorable para el medio ambiente, por otra parte, la complejidad de su composición hace aún más complicado su reciclaje, puesto que se utilizan métodos de unión de los materiales muy complejos de deshacer para garantizar su durabilidad. Como observamos en la siguiente gráfica, las tasas de reciclado de residuos plásticos son hasta trece veces superiores cuando se recogen por separado en comparación con los sistemas de recogida de residuos mezclados. [Gráfica 8]

En España, Ecoembes, una de las principales organizaciones de gestión de residuos, nos indica que estos residuos compuestos que se han de depositar en cuyo caso en contenedores grises, pasan a ser depositados directamente en vertederos, dado que se tratan de productos de última generación que no tienen ningún otro uso para las industrias.

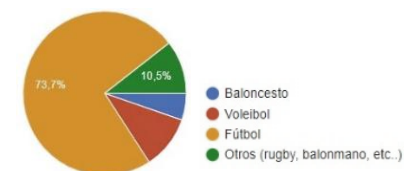
Para reconocer este problema de forma más cercana, asentando las bases de la investigación, se ha realizado una encuesta dirigida a trabajadores dedicados a la gestión deportiva en colegios de Sevilla, en la que se determina la gestión de este tipo de residuos por parte de los colegios y centros deportivos. El resultado nos dará información precisa sobre el destino real de una gran parte de los balones que dejan de ser usados como tal. [Gráficas 9, 10 y 11]

Hemos obtenido un total de 19 respuestas, gracias a las cuales, llegamos a la conclusión de que los balones de fútbol son el material deportivo más utilizado en los centros educativos, que éstos suelen ser sustituidos por material nuevo cada trimestre, por lo que se produce un gran gasto residual, y que además tan solo en el 10,5% de los casos, se llevan a un punto limpio para proceder a su reciclaje.

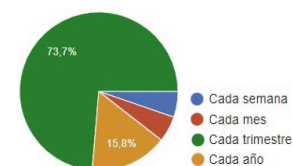
Como conclusión de esta encuesta, determinamos que sería de gran interés la reutilización de los diferentes materiales que componen dichos balones, para así contribuir con erradicar la contaminación del medioambiente provocado por los deshechos causados por estos residuos.



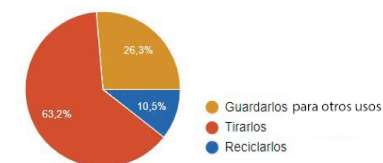
Gráfica 8. Recogida de residuos plásticos mixtos y separados en 2020. Fuente: Conversio Market.



Gráfica 9. Tipo de balones más utilizados en la enseñanza deportiva.



Gráfica 10. Frecuencia de cambio de balones por nuevos.



Gráfica 11. ¿Qué se hace con los balones cuando acaba su vida útil? Fuente: Elaboración propia.

02.4. En el sector de la construcción.

Los productos diseñados con fibras de vidrio y otros materiales plásticos tejidos han dado paso a una era completamente nueva en lo que respecta a la forma en que diseñamos y construimos edificios. Se conoce que las placas de cartones yesos de alta dureza implementan en su composición dichas fibras de vidrio. También el uso de plásticos tejidos en combinación con cementos y hormigones, lo que conocemos como “mallas de gallinero”, son empleadas para reforzar la sujeción y la uniformidad del emparchado o para dar una mayor resistencia a capas de hormigón como puede ser la de nivelación de la solería.

-Placa de yeso laminado Knauf alta dureza [Figura 2]

“La placa de yeso laminado Knauf Alta Dureza tipo DI está compuesta por un alma de yeso con aditivos, mezclado con fibra de vidrio y recubierta por ambas caras con una lámina de celulosa. Su fabricación se realiza mediante un proceso de laminación continua y acorde a la norma UNE-EN 520:2005 + A1:2010. Dispone de una cara vista de color amarillo que permite cualquier acabado final según lo indicado en la hoja técnica. La cara oculta es de color marrón. Para facilitar el tratamiento de juntas, los bordes longitudinales están afinados o bien en borde cuadrado para aplicaciones especiales. Los bordes transversales son cortados. La placa Alta Dureza está dotada de una mayor dureza superficial, siendo por ello resistente a golpes y rozaduras.”

Por otro lado, la espuma rígida de poliuretano es uno de los materiales más utilizados para su empleo en productos de aislamiento y sellado de aire, tanto en techos como en paredes. Se encuentra incluido en placas de distintas densidades, también en forma de espuma proyectada y en una amplia gama de productos que incluyen revestimientos, adhesivos, selladores y elastómeros.

- Panel de acero galvanizado con núcleo de espuma de poliuretano [Figura 3]

“*FormaWall* es un panel compuesto por un núcleo de espuma libre de halógenos y dos caras de acero galvanizado de textura lisa o gofrada. El panel vertical dispone de junta entre paneles con doble machihembrado, con las fijaciones ocultas. El panel horizontal es de machihembrado simple y fijación oculta. La estanqueidad vertical entre dos paneles horizontales se consigue mediante un perfil de caucho EPDM de sellado. Este panel proporciona un aislamiento térmico de modelo estándar, factor K, de 0,44 W/ m·K.”

Esto demuestra que podría existir la oportunidad de explorar la viabilidad de reutilizar desechos de estos residuos para la creación de productos para la construcción. Se considera de utilidad la comparación de nuestras propuestas a base de materiales reciclados con los resultados de los ensayos realizados por laboratorios certificados para los fabricantes de estos productos, reflejados en sus Documentos de Idoneidad técnica (DIT) y en sus fichas. Servirán de referencia para la comparación de los resultados que se obtendrán tras la realización de las probetas que se propondrán en este trabajo de investigación. Esto último se considera además imprescindible, ya que en caso de que se obtengan resultados competentes y dentro de los valores normalizados, se competirá con estos mismos productos.



Figura 2. Placa de yeso laminado Knauf de alta dureza. Fuente: Knauf.

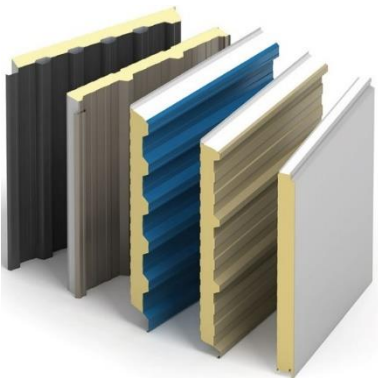


Figura 3. Panel sándwich de espuma de poliuretano FormaWall. Fuente: ArchiExpo by VirutalExpo Group.

02. ESTADO DE LA CUESTIÓN

02.5. Estudios de referencia.

Para el desarrollo del trabajo de investigación hemos hecho una búsqueda de la cual hemos obtenido las siguientes conclusiones en base a una serie de estudios previos.

02.1.1. “Caracterización de placas de yeso laminado con residuos de espuma de poliuretano reforzada con fibras de polipropileno” *Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, Universidad de Burgos, España*. Artículo publicado en ‘Materiales de Construcción’.

Como estudio de referencia sobre la mejora de la resistencia mecánica de una placa de yeso que incorpora en diversas combinaciones de residuos de espuma de poliuretano y fibras de polipropileno. [Referencia 3]

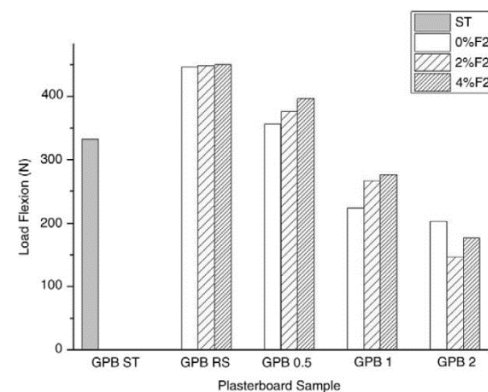
Se realizaron una serie de estudios normalizados sobre densidad aparente, carga máxima de rotura bajo tensión de flexión, absorción total de agua, dureza superficial, propiedades térmicas y reacción al fuego. [Tabla 1]

El estudio se aproxima con tres porcentajes de material aditivo, 0%, 2% y 4%. Siendo: F2 el porcentaje de fibras de poliuretano; “ST” la placa comercial; “RS” la probeta de referencia fabricada para la prueba sin material reciclado y el valor numérico tras “GPB” la relación de la mezcla foam - yeso con la que se realizan las probetas. [Gráfica 12]

Los resultados muestran que el incremento de residuo polimérico en el material implica importantes reducciones de peso, resistencia mecánica y dureza superficial, a la par que se mejora su resistencia térmica. Las fibras de polipropileno muestran una buena adhesión con el polímero, mejorando el comportamiento mecánico y capacidad de absorción. En ensayo de reacción al fuego confirmó el cumplimiento con la normativa.

Series no.	Sample	Volume ratio (PF/W/ plaster)	Water/ (conglomerate) ratio	Weight/ surface ratio (Kg/m ²)	Bulk density (Kg/m ³)	Surface Hardness (Avg. Ø, mm)	Water Absorption (Avg.%)
Comercial	GPB ST	-	-	9.60	744	16.33	31.87
Reference	GPB RS	0/1	0.47	21.23	1416	11.33	27.36
Series I (0% F2)	GPB0.5	0.5/1	0.52	19.45	1297	13.22	32.66
	GPB1	1/1	0.60	18.03	1202	14.33	40.81
	GPB2	2/1	0.82	14.32	955	16.56	61.59
Series II (2% F2)	GPB RS2F2	0/1	0.47	18.90	1350	9.83	21.15
	GPB0.5 2F2	0.5/1	0.52	17.96	1283	11.00	25.59
	GPB1 2F2	1/1	0.60	16.87	1205	12.89	32.03
GPB 2 2F2	2/1	0.82	13.44	960	18.11	51.31	
Series III (4% F2)	GPB RS4F2	0/1	0.47	20.26	1447	9.44	21.41
	GPB0.5 4F2	0.5/1	0.52	19.05	1361	10.89	26.00
	GPB1 4F2	1/1	0.60	17.70	1264	12.44	32.91
GPB2 4F2	2/1	0.82	14.46	1033	16.44	50.91	

(*) Comercial Standard Plasterboard Type A (EN-520)



Gráfica 12. Valores de rotura a flexión. Fuente: ‘Materiales en Construcción’, estudio de la Universidad de Burgos.

Tabla 3. Relación entre la resistencia a la rotura por tracción (TS) o la resistencia a la flexión (FS) y la resistencia a la compresión (CS).

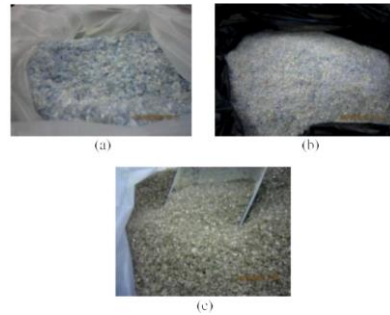


Figura 4. Granulado de PET utilizado en el estudio.
Fuente: Estudio Universidad de Lisboa.

Concrete type	TS/CS	FS/CS
Ref	0.081	0.110
PC5	0.088	0.124
PC10	0.102	0.138
PC15	0.121	0.158
PF5	0.085	0.118
PF10	0.092	0.122
PF15	0.090	0.118
PP5	0.085	0.120
PP10	0.085	0.115
PP15	0.086	0.119

O2.1.2. “Residuos de tereftalato de polietileno como árido en el hormigón” *Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidad Técnica de Lisboa, Portugal*. Estudio colaborativo entre Nabajyoti Saikia y Jorge de Brito.

Como estudio de referencia sobre la mejora del comportamiento resistente del hormigón con tres tipos de áridos de tereftalato de polietileno (PET) reciclado dispuesto en distintos tamaños y formas. [Referencia 7]

En este caso utilizan el PET en 3 estados distintos, tras pasar por el triturado “PC” (a), en un punto intermedio antes de ser extruido “PF” (b), y en forma de gránulos tras ser extruidos “PP” (c). [Figura 4]

Sus características son las siguientes mostradas en la [Tabla 2], que muestran una menor densidad en los PC, y los resultados a destacar son los de la [Tabla 3], en los cuales se muestra como existe una mejora de la proporción flexión/compresión de los plásticos menos tratados y en mayor tamaño PC.

La incorporación de árido de PET mejora el comportamiento a tenacidad del hormigón resultante. Este comportamiento depende de la forma del PET-agregado y se maximiza para el hormigón que contiene PET-agregado grueso y escamoso. Las características de resistencia a la tracción y a la flexión son proporcionales a la pérdida de resistencia a la compresión del hormigón que contiene áridos plásticos.

Property	Method used	Results				
		CA	FA	PC	PF	PP
Particle density	SSD basis (kg.m ⁻³) EN 1097-6	2606	2643	1344	1344	1344
Water absorption	dry basis, 24 h (%) EN 1097-6	0.63	0.20	0.18	0.25	0.10
Bulk density	(kg.m ⁻³) ASTM C 29/C 29M-97	1418	1441	351	555	827

SSD: saturated surface dry; CA: coarse natural aggregate; FA: fine natural aggregate.

Tabla 2. Características de los aditivos del estudio realizado.

02. ESTADO DE LA CUESTIÓN

02.1.3. “Utilización de fibras recicladas de botellas de PET para el refuerzo del hormigón” *Politécnico de Bari, Departamento ICAR, Bari, Italia. Artículo.*

Como estudio de referencia sobre los resultados de algunos ensayos realizados con probetas de hormigón reforzadas con fibras fabricadas a partir de botellas de tereftalato de polietileno (PET) de desecho. [Referencia 5]

Utiliza fibras de PET que se han obtenido simplemente cortando botellas; a continuación, se añaden al hormigón de mezcla o se utilizan como refuerzo discreto de probetas y pequeñas vigas en sustitución de barras de acero. Por lo tanto, trata de analizar los resultados mecánicos.

Entre las conclusiones, se muestra como el PET no tiene problemas de adherencia con el hormigón como muestra la imagen de la rotura de las vigas incluida en su artículo. [Figura 5]

La caída de la carga es de alrededor 70% respecto a la carga de fisuración para el PET en 0,50%, del 55% para el PET en 0,75% y de 35% para el PET en 1%. Los resultados confirman que en el caso del PET 1% las fibras están presentes en cantidades mayores que en las otras probetas ensayadas y absorben más fácilmente la carga transferida por el hormigón agrietado. [Figura 6]

Todo esto nos permite una aproximación sobre a qué valores entran dentro de lo común y pueden llegar a resultar útiles en la aplicación de nuestro producto en el sector de la construcción. Además, nos sirven de comparación para realizar el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Ademas en ambos estudios se concluye que la implementación de este tipo de materiales reciclados es inversamente proporcional a la reducción de los materiales de primera generación tratados mediante procesos industriales normalizados, como son el yeso en polvo o el cemento. Esto indica que se deberá enfocar la investigación en buscar una reducción admisible recalando las ventajas ecológicas y económicas de la implementación de productos que ya no disponen de ningún uso. Esto tambien se puede percibir en el resto de los estudios citados en nuestra bibliografía.

Los resultados obtenidos son muy interesantes, especialmente en lo que respecta a la adherencia entre el PET y el hormigón, lo que sugiere una posible utilización de este material en forma de barras planas o redondas, o de redes para el refuerzo estructural.



Figura 5. Compresión del hormigón con agregado de PET. Fuente: estudio Universidad de Bari.

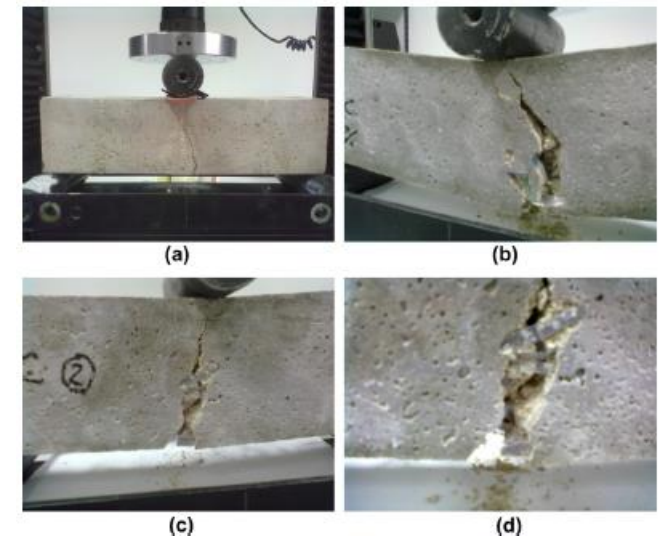
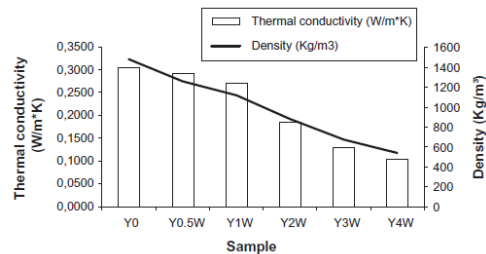
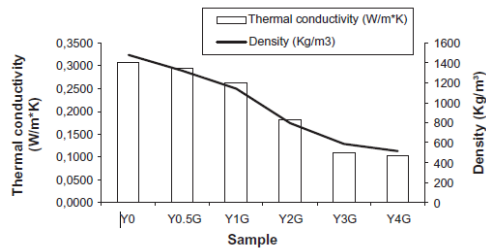


Figura 6. Compresión del hormigón con agregado de PET. Fuente: estudio Universidad de Bari.

02.1.4. “Compatibilidad entre residuos de yeso y polvo de poliuretano para producir yeso ligero con mejores propiedades térmicas” *Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingenierías de la Construcción y del Terreno, Universidad de Burgos, España. Artículo.*

Sample	Dry density at 7 days (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/m ² K)
Plasterwork with perlites	-	0.1800
Plasterwork	-	0.3000
Concrete with lightweight fines	-	0.3300
Y0	1477	0.3057
Y0.5G	1323	0.2931
Y1G	1140	0.2626
Y2G	795	0.1828
Y3G	590	0.1105
Y4G	516	0.1014
Y0.5W	1258	0.3160
Y1W	1114	0.2701
Y2W	879	0.1861
Y3W	674	0.1285
Y4W	535	0.1039

Tabla 5. proporciones y características de las probetas realizadas por el estudio.



Tablas 6 y 7. proporciones y características de las probetas realizadas por el estudio.

Como estudio de referencia sobre la mejora en la conductividad térmica en productos de yeso con aditivos plásticos, se referencia el artículo sobre el estudio realizado por la Universidad de Burgos de mezclas de yeso con polvo de poliuretano. [Referencia 11]

Se prepararon cinco mezclas de yeso blanco y cinco de yeso gris utilizando diferentes proporciones volumétricas de poliuretano, 0,5%, 1%, 2%, 3% y 4%. De ellas se examinó su comportamiento térmico mediante termogravimetría y se estudió la conductividad térmica, ambos para establecer su posible aplicación como aislante térmico.

En la siguiente tabla se realiza la comparativa de relación de volumen, relación agua/conglomerado, densidad y porosidad. Siendo “Y0” el de referencia sin aditivo de poliuretano; “YxG”, las probetas con una relación Poliuretano gris/yeso; “YxW”, las probetas con una relación Poliuretano blanco/yeso. [Tabla 4]

En los resultados expuestos en el estudio se observa cómo hay una mejora proporcional de la conductividad térmica en función de la cantidad de Poliuretano añadido [Tabla 5]. También relacionado directamente con la densidad del material resultante [Tablas 6 y 7].

Nuestros resultados muestran que un aumento de la cantidad de poliamida afecta a las propiedades del yeso, disminuyendo su densidad y sus propiedades mecánicas, así como aumentando su permeabilidad y su resistencia térmica.

Series no.	Sample	Volume ratio (PFW/plaster)	w/(p + PFW)	Setting time (min)	Density at 7 days-wet specimens (kg/m ³)	Density at 7 days-dry specimens (kg/m ³)	Water retention (%)
Reference	Y0	0/1	0.40	10.3	1713	1477	16.0
Series I	Y0.5G	0.5/1	0.46	13.0	1620	1323	20.1
	Y1G	1/1	0.57	18.0	1493	1140	23.9
	Y2G	2/1	0.94	28.0	1272	795	32.3
	Y3G	3/1	1.36	39.0	1135	590	36.9
	Y4G	4/1	1.70	42.0	1030	516	34.9
Series II	Y0.5W	0.5/1	0.52	10.0	1583	1258	22.0
	Y1W	1/1	0.60	12.0	1483	1114	25.0
	Y2W	2/1	0.82	21.0	1335	879	30.9
	Y3W	3/1	1.15	32.0	1181	674	34.3
	Y4W	4/1	1.45	32.5	1073	535	36.4

Tabla 4. Proporciones y características de las probetas realizadas por el estudio.

03. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

03. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.

En el presente trabajo de investigación trataremos de dar una nueva utilización a un producto cuya vida útil actualmente es corta, aplicándolo en el ámbito de la construcción.

03.1. Objetivos generales.

Por ello, se pretende investigar y llegar a resultado global como:

- a. Conocer la producción del plástico, sus tipos y su reciclaje, para concienciar sobre su difícil eliminación.
- b. Realizar la búsqueda de un material resultante con características admisibles para la construcción reutilizando materiales que provocan un impacto medioambiental.
- c. Analizar los efectos de la huella de carbono de un material base en la construcción, como es el yeso, para reducir su uso implementando un nuevo material ecoeficiente.
- d. Investigar la dificultad que supone en la cadena de reciclaje la existencia de productos fabricados con materiales compuestos, como son los balones.

03.2. Objetivos específicos.

Profundizando en la elaboración de un nuevo material elegido, planteamos los siguientes objetivos:

- a. Realizar una detallada investigación sobre las propiedades de los materiales de las distintas capas que forman un balón, espuma de Poliuretano e hilos de Polietileno Tereftalato.
- b. Experimentar con diferentes proporciones de aditivos al yeso los materiales propuestos y analizar su comportamiento para su posible utilización como aligerante así como su comportamiento mecánico y térmico.
- c. Estudiar las posibles aplicaciones en productos constructivos de los materiales que conforman un balón gracias al estudio de las características mecánicas y térmicas de éstos.
- d. Proponer un uso específico del nuevo producto en un proyecto existente reflejando su viabilidad y comparándolo con sus equivalentes en el mercado actual.

04. HIPÓTESIS DE PARTIDA.

Una vez conocida la realidad del problema que supone la contaminación de balones de fútbol en el medio ambiente y tras una búsqueda exhaustiva de casos experimentales que lleguen a mejorar las características constructivas tales como la ligereza, el rendimiento mecánico y propiedades de asilamiento, basaremos nuestra hipótesis en la comparación de dichos resultados.

Se realiza en este trabajo una serie de ensayos y pruebas en laboratorio, tanto mecánicas como térmicas, elaborando probetas de yeso a las que añadiremos diferentes proporciones de espuma de poliuretano o de hilos de urdimbre de polietileno de tereftalato (PET), obtenidos de las diferentes capas que componen un balón de fútbol.

La geometría del material residual añadido será de diferente tamaño según estudiemos el comportamiento mecánico o el térmico, siendo para este último un tamaño de residuo reducido prácticamente a la mitad, debido a la diferente geometría de las probetas utilizadas en ambos ensayos. Para los estudios mecánicos, utilizaremos tres cantidades de residuo de hilos de urdimbre de PET añadidas, 1%, 2,5% y 4%. La geometría utilizada será irregular de dimensiones mínimas de 1x1,5 cm y máximas de 1,5x2 cm. Mientras que para los estudios acústicos utilizaremos tan solo una cantidad de residuo añadido para cada uno de los dos materiales utilizados por separados, que será del 4%. La geometría en este caso será, aproximada de 0,5x1 cm para los hilos de urdimbre de PET, y de 0,3x0,6 cm, en el caso de la espuma de poliuretano.

En cuanto a la resistencia obtenida de ambos materiales utilizados, como observamos en los estudios de referencia encontrados, no mejorará el material, sino que será similar o incluso algo menor a la probeta sin aditivos, pero sí que se convertirá en un material más ligero. En lo relacionado a la fatiga esperamos que se comporte de manera positiva, y que aumente su durabilidad a largo plazo.

En cuanto al comportamiento térmico, tampoco se produce una mejora considerable frente al material sin aditivos, pero igualmente se convertirá en un material más ligero.

La finalidad que queremos alcanzar es la mejora global que conseguimos con el nuevo material, tanto mecánicas y térmicas, como económicas y medioambientales.

05. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Para llevar a cabo la investigación de este trabajo se ha realizado un riguroso proceso de conocimiento sobre el material a estudiar: los balones deportivos compuestos por PET y espuma de poliuretano. Así como su problemática en el medio ambiente y sus posibles ventajas en el mundo de la construcción y como consecuencia la mejora que llega a producir en la economía circular del reciclaje.

La metodología de este Trabajo de Fin de Grado se ha basado en una revisión bibliográfica, una recopilación y unos análisis de datos. Ha sido crucial la búsqueda de otros estudios de referencia basados en este mismo sector para su análisis, ver su comportamiento y sacar conclusiones de los diferentes resultados.

Las elaboraciones de probetas de yeso con espuma de poliuretano e hilos de urdimbre de polietileno tereftalato (PET) para ensayo térmico, y éste último material también lo utilizaremos para elaborar las probetas de ensayo mecánico, han mostrado un comportamiento diferente con respecto a las probetas compuestas únicamente de yeso que ha sido comparadas. Por otro lado, para poder llegar a una propuesta se elabora una formulación de objetivos y preguntas de investigación que conduce a una discusión, análisis de resultados, conclusiones y elaboración de un informe final en el que se diseña un producto constructivo y un análisis de su comportamiento dentro de otro proyecto arquitectónico.

La investigación que hemos llevado a cabo se basa en las siguientes fases:

- 1- Proceso de investigación para el análisis bibliográfico y estudio del estado actual, adquiriendo conocimientos previos.
- 2- Elaboración de probetas en laboratorio.
- 3- Realización de la fase experimental en laboratorio, con ensayos mecánicos y térmicos.
- 4- Recopilación y análisis de los resultados obtenidos en la fase experimental.
- 5- Aplicación del producto en un caso real, basado en las conclusiones del análisis.
- 6- Análisis, comparación del producto con uno real del mercado, y conclusión.

06. EXPERIMENTACIÓN.

El estudio previo sobre los residuos plásticos, así como, sobre los balones y, concretamente, los balones de fútbol, a menudo desechadas, nos conduce a la investigación de los componentes que los conforman: la espuma de Poliuretano y los hilos de urdimbre de Polietileno Tereftalato (PET). Una vez que indagamos sobre los materiales, proponemos una serie de hipótesis las cuales aceptaremos o descartaremos según los resultados obtenidos en cuanto a la capacidad de absorción térmica y sus capacidades de resistencia mecánica.

Para el ensayo mecánico, utilizaremos la combinación de yeso con los hilos de PET, mientras que, para el ensayo térmico, utilizaremos tanto la mezcla de yeso con los hilos de PET, como la mezcla de yeso con la espuma de poliuretano.

El análisis que se realiza en cada uno de los apartados presenta las medias de las distintas propiedades ensayadas de la combinación de materiales propuestas en sus distintos porcentajes. Con esto se busca homogeneizar los resultados de las distintas probetas entorno a su porcentaje de aditivo. Se sitúan a posterior en una gráfica los valores medios obtenidos y los porcentajes de los aditivos y se realiza un análisis de regresión simple. Con este análisis, se obtiene un modelo para pronosticar como afecta a sus distintas propiedades la incorporación del material propuesto. La recta de regresión, indica los valores esperados en las características de una mezcla con un porcentaje distinto a los ya estudiados. Cuanto menor sea la desviación de las medias, mayor será la precisión de la recta de regresión.

06.1. Ensayo mecánico.

06.1.1. Introducción a la metodología y normativa de aplicación.

Para el estudio de la caracterización del PET obtenido de un balón se han evaluado su composición y sus propiedades, así como la densidad, resistencia mecánica a compresión y a flexión. La interpretación de las características del PET es de gran relevancia para garantizar que el material funcione correctamente en la construcción además de tener beneficios sostenibles y resistentes. El uso de balones de fútbol y de voleibol en concreto se debe a que son más populares y utilizados a nivel global, lo que supone una mayor reutilización de este material, y, por tanto, un mayor porcentaje de reciclaje.

Para realizar el ensayo mecánico se han elaborado una serie de probetas a partir de una mezcla de yeso y agua, teniendo en cuenta la relación de 0,55 gramos de agua por cada gramo de yeso. En esta mezcla también se encuentra el material, en este caso de PET, que va cambiando su cantidad de residuo en función del porcentaje que se le conceda a cada probeta. Estas muestras se han elaborado en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura con materiales del propio departamento, empleando las probetas de moldeo para dar forma a la mezcla del yeso y PET.

En cuanto a la normativa de aplicación, las normas UNE-EN establecen los requisitos y especificaciones técnicas en el sector de la construcción, asegurando la calidad y la seguridad de los productos y servicios. En este caso, se abarcan las relacionadas con la resistencia mecánica de los materiales. Los ensayos de esta normativa son los siguientes:

- **UNE-EN-13279-1:2009:** Especificaciones para la realización de ensayos a base de yeso.
- **UNE-EN-13279-2:2014:** Determinación de la resistencia a flexión y compresión del yeso endurecido.
- **UNE-EN 772-16:2011:** Determinación de las dimensiones de las probetas para la caracterización mecánica, que son de 40x40x160mm.

06.1.2. Elaboración y dosificación de probetas

Para el desarrollo de nuestra investigación en su fase experimental, realizaremos, en este caso, ensayos mecánicos para analizar la resistencia del material compuesto por yeso e hilos de urdimbre de polietileno tereftalato (PET). El entrelazamiento de los hilos de PET genera una estructura entrelazada que puede llegar a favorecer la resistencia mecánica, esto permite una mejora en el comportamiento a flexión y a tracción.

Con estas características partimos de la hipótesis de que dicho material podría mejorar las características de resistencia si se aplicase en productos utilizados en el sector de la construcción.

Para poder realizar este estudio de manera adecuada, optamos por elaborar diferentes muestras que nos permitan comparar cómo varían las propiedades del producto final dependiendo del porcentaje de aditivo añadido. Por este motivo, se realizarán cuatro grupos de muestras, con seis probetas en cada uno de ellos.

Estos cuatro grupos se definen como:

- Grupo 0: muestra de yeso sin aditivo.
- Grupo 1: muestra de yeso con aditivo en porcentaje menor (1%).
- Grupo 2: muestra de yeso con aditivo en porcentaje medio (2,5%).
- Grupo 3: muestra de yeso con aditivo en porcentaje mayor (4%).

La ejecución de cada uno de los grupos de muestras se realizará empleando dos moldes de tres probetas cada uno, de 40x40x150mm, de acuerdo con la normativa UNE especificada en el anterior apartado 06.1.1. Como resultado final, obtendremos un total de veinticuatro probetas para el estudio mecánico de yeso con aditivo de hilos de PET.

La mezcla de materiales, en nuestro caso, consistirá en la adición de capas de hilos de PET a la mezcla de yeso, que iremos añadiendo durante su amasado, obteniendo así una distribución homogénea y uniforme, y posteriormente vertiendo la mezcla en cada una de las seis probetas para cada porcentaje de muestra.

La cantidad de agua y yeso ha sido pesada y medida en básculas de precisión y jarras de medición que encontramos en el Laboratorio de Construcción, aportando también los moldes rectangulares para la muestra [Imagen 2]. En dicho laboratorio se dan unas condiciones ambientales no controladas, que varían entre los 20 y 25°C. Las mezclas, a su vez, han sido realizadas gracias a los instrumentos facilitados por el mismo departamento de Construcciones Arquitectónicas.

Entre los instrumentos utilizados para elaborar las muestras encontramos: báscula de precisión, pincel, jarra de medición, espátula de silicona, recipiente metálico, pala dosificadora y molde de acero.

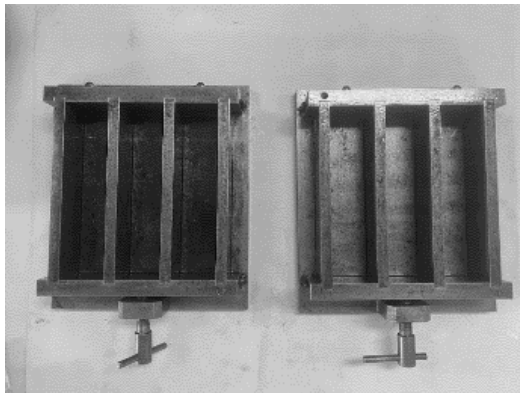


Imagen 2. Moldes de acero para la fabricación de probetas. Fuente: elaboración propia.

06. EXPERIMENTACIÓN

Para el ensayo, hemos utilizado balones de fútbol sin uso, de la marca *Kipsta*, pero en la realidad, todos los balones que hayan sido utilizados se consideran contaminados, por haber estado en contacto con residuos procedentes de todas las superficies con las que ha estado en contacto, por lo que se consideran no reciclables, además de que, al estar compuestos por varios materiales, pegados o cosidos entre sí, dificulta mucho más el proceso de reciclado. Por eso en este trabajo plantearemos la reutilización en el campo de la construcción, consiguiendo dar una nueva vida útil al producto.

Indagando sobre la composición del residuo utilizado, en este ensayo nos centramos únicamente en los hilos de urdimbre de polietileno tereftalato (PET) [Imagen 3], que, debido a su geometría y características, decidimos cortar en formas irregulares de dimensiones mínimas de 1x1,5 cm y máximas de 1,5x2 cm. [Imagen 4]

El primer paso para la elaboración de las probetas fue tarar el recipiente utilizado para depositar el yeso y la jarra para medir el agua, y así posteriormente, poder pesar la cantidad exacta de yeso y agua que vamos a utilizar en la mezcla. El yeso facilitado por el laboratorio es del tipo B1/50/2.

La relación yeso-agua debe ser un 55% del peso del yeso. Calculamos 0,55 gramos de agua por cada gramo de yeso. Pero antes de realizar dicha la mezcla, debemos limpiar los moldes de las probetas y aplicarles una capa de desencofrante, para facilitar la posterior extracción de la probeta.

En cada uno de los moldes de 40x40x160mm caben unos 300 gr de producto, por lo que las cantidades que resultan para cada una de las configuraciones es la siguiente:

- Grupo 0 → muestra de yeso sin aditivo.

$$300 \text{ gr} * 6 \text{ probetas} = 1800 \text{ gr de yeso}$$

$$1800 \text{ gr} * 0,55 = 990 \text{ gr de agua}$$

- Grupo 1 → adición del 1% de hilos de PET, que equivale a 3 gr de PET por cada una de las probetas.

$$1800 \text{ gr} - (3 \text{ gr} * 6 \text{ probetas}) = 1782 \text{ gr de yeso}$$

$$1782 \text{ gr} * 0,55 = 980,1 \text{ gr de agua}$$

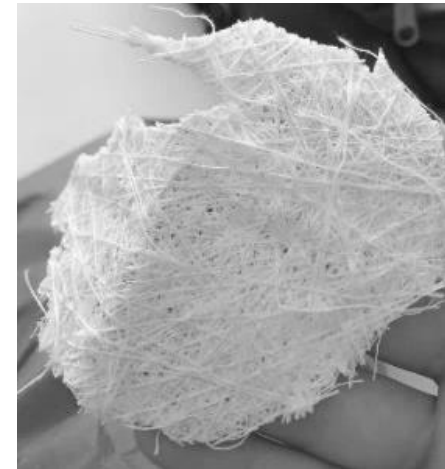


Imagen 3. Hilos de polietileno de tereftalato procedente de la capa interior de un balón de fútbol. Fuente: elaboración propia.

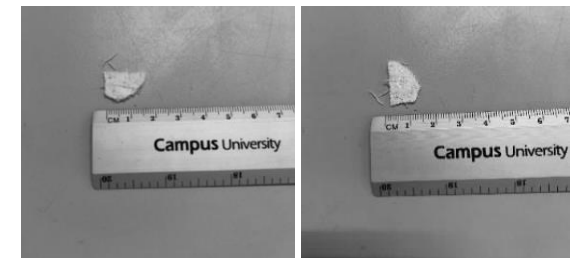


Imagen 4. Granulometría hilos de polietileno de tereftalato procedente de la capa interior de un balón de fútbol. Fuente: elaboración propia.



Imagen 5. Mezcla de yeso con hilos de PET. Fuente: elaboración propia.



Imagen 6. Mezcla de yeso, hilos de PET y agua. Fuente: elaboración propia.

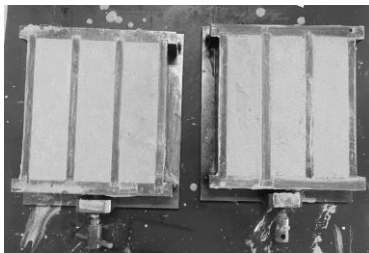


Imagen 7. Probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

- Grupo 2 → adición del 2,5% de hilos de PET, que equivale a 7,5 gr de PET por cada una de las probetas.

$$1800 \text{ gr} - (7,5 \text{ gr} \times 6 \text{ probetas}) = 1755 \text{ gr de yeso}$$

$$1755 \text{ gr} \times 0,55 = 965,25 \text{ gr de agua}$$

- Grupo 3 → adición del 4% de hilos de PET, que equivale a 12 gr de PET por cada una de las probetas.

$$1800 \text{ gr} - (12 \text{ gr} \times 6 \text{ probetas}) = 1728 \text{ gr de yeso}$$

$$1728 \text{ gr} \times 0,55 = 950,4 \text{ gr de agua}$$

Realizaremos la mezcla de los gramos de yeso y de los gramos de aditivo de hilos de PET calculados anteriormente en cada uno de los cuatro grupos de muestras [Imagen 5] y a continuación iremos vertiendo con cuidado la cantidad de agua calculada, sin parar de mezclar, hasta que quede una masa homogénea, con las partículas de hilos de PET distribuidas de la manera más uniforme posible [Imagen 6]. Posteriormente procedemos al vertido de la mezcla en cada uno de los seis moldes para cada porcentaje. Debemos rellenar cada probeta hasta la mitad con la mezcla obtenida y dar 6 golpes (según UNE-EN 13279-2:2009) para que se asiente la mezcla y después continuar llenado hasta el final.

Algo importante para tener en cuenta con el tipo de material elegido es que realmente el margen de error en el pesaje de yeso y de agua, hará que la densidad del material aditivo no sea significativa, ya que el añadido de poliamidas corresponde en igual medida a la cantidad de yeso y agua del margen de error.

Repetiremos este proceso en cuatro ocasiones para cada uno de los grupos de muestras, obteniendo de esta manera un total de 24 probetas. Seis probetas de yeso sin aditivo, seis probetas con un 1% de aditivo de hilos de PET, seis probetas con un 2,5% de aditivo, y otras seis con un 4%. [Imagen 7]

06. EXPERIMENTACIÓN

06.1.3. Metodología del ensayo.

El ensayo de comportamiento mecánico se lleva a cabo teniendo en cuenta la normativa de aplicación de las normas UNE EN-13279-2:2014. En concreto, la normativa UNE EN-196:2005.

Para conocer la viabilidad del material propuesto en el sector de la construcción, es necesario determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Por ello, el material se someterá a una serie de ensayos, empezando por determinar la densidad del material, y analizando su comportamiento mecánico.

Previamente a las pruebas realizadas, debemos dejar secar las probetas, en este caso el tiempo de curado del yeso es de unos 7 días. Las probetas de ensayo mecánico fueron realizadas el 24 de febrero de 2023. Durante el tiempo de fraguado, se deben de ir pesando hasta obtener un peso estable, lo que significaría que han terminado de evaporar la cantidad de agua sobrante [Tabla 8]. En nuestro caso fueron pesadas el 03, 06 y 07 de marzo de 2023, como observamos en las siguientes tablas adjuntas:

PORCENTAJE	PESO 03/03	PESO 06/03	PESO 07/03	PORCENTAJE	PESO 03/03	PESO 06/03	PESO 07/03
PET	gr	gr	gr	PET	gr	gr	gr
0%	326,300	318,510	318,100	1%	322,810	320,680	320,380
0%	329,180	318,570	318,060	1%	321,210	312,780	317,500
0%	330,290	321,550	321,130	1%	320,400	312,470	312,220
0%	343,880	325,160	324,730	1%	322,050	313,590	313,360
0%	350,280	329,350	328,910	1%	332,400	323,540	323,250
0%	356,020	328,270	327,860	1%	321,050	317,420	317,180
MEDIAS	339,325	323,568	323,132	MEDIAS	323,320	316,747	317,315

PORCENTAJE	PESO 03/03	PESO 06/03	PESO 07/03	PORCENTAJE	PESO 03/03	PESO 06/03	PESO 07/03
PET	gr	gr	gr	PET	gr	gr	gr
2,50%	356,330	309,340	308,670	4%	352,820	320,300	312,530
2,50%	363,090	313,270	311,820	4%	347,220	319,570	314,710
2,50%	364,170	317,510	315,490	4%	332,750	316,750	315,830
2,50%	362,920	315,930	311,400	4%	316,180	308,030	307,650
2,50%	358,890	318,960	313,130	4%	326,160	318,140	317,810
2,50%	358,270	319,840	313,950	4%	325,730	317,300	316,910
MEDIAS	360,612	315,808	312,410	MEDIAS	333,477	316,682	314,240

Tabla 8. Reducción de peso de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

Para hallar la densidad aparente de las muestras, debemos conocer la dimensión de la muestra y el peso. Con estos datos, se hará la relación peso (gr) / volumen (cm³), siendo el volumen el mismo en todos los casos, 256cm³. [Tabla 9]

PORCENTAJE	PESO MEDIO	DENSIDAD MEDIA
PET	gr	gr/cm ³
0%	323,132	1,262
1%	317,315	1,240
2,50%	312,410	1,220
4%	314,240	1,228

Tabla 9. Densidad media de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se realiza un análisis unidimensional de la densidad de cada porcentaje de probeta:

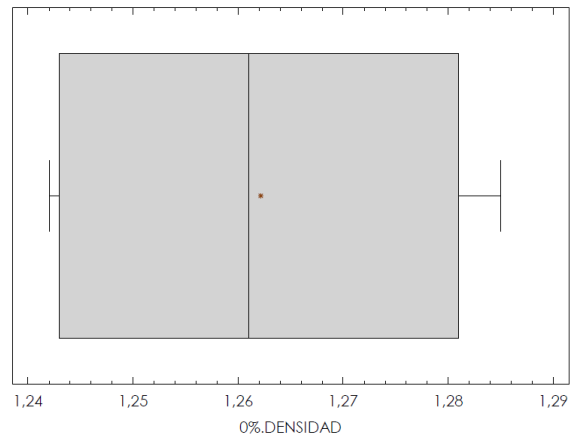


Diagrama 1. Densidad probetas con 0% de PET.

Mediana = 1,26217

Desviación típica = 0,0187127

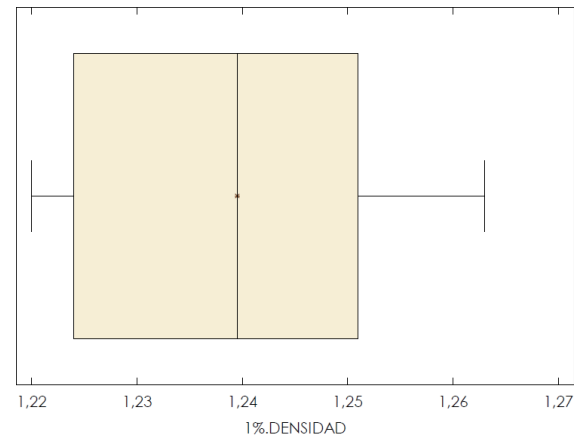


Diagrama 2. Densidad probetas con 1% de PET.

Mediana = 1,2395

Desviación típica = 0,0161586

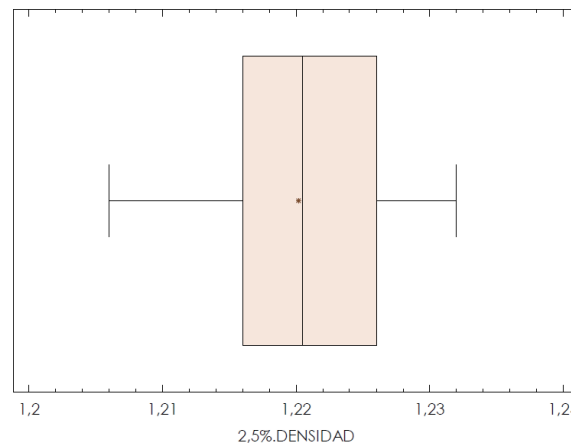


Diagrama 3. Densidad probetas con 2,5% de PET.

Mediana = 1,22017

Desviación típica = 0,00899815

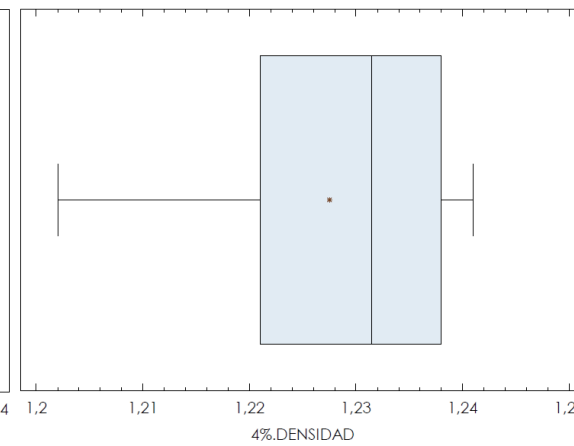


Diagrama 4. Densidad probetas con 4% de PET.

Mediana = 1,2275

Desviación típica = 0,0143492

06. EXPERIMENTACIÓN

En las gráficas de caja y bigotes anteriores [Diagramas 1, 2, 3 y 4], observamos una mayor dispersión de resultados en la gráfica que corresponde a la muestra de referencia, seguida de la muestra con aditivo de PET en porcentaje del 1%, que puede deberse a una distribución menos homogénea de los trozos de PET debido a su menor cantidad en presencia dentro de la muestra.

Una vez analizadas las densidades de las distintas muestras, en la [Gráfica 13] de regresión polinomial, se observa un descenso progresivo de la densidad a la vez que aumenta el porcentaje de hilos de PET, con un repunte en el porcentaje del 4%. La diferencia entre los porcentajes de adición de PET en cada muestra es de un 1,5%, y en los resultados se pueden observar variaciones muy bajas también.

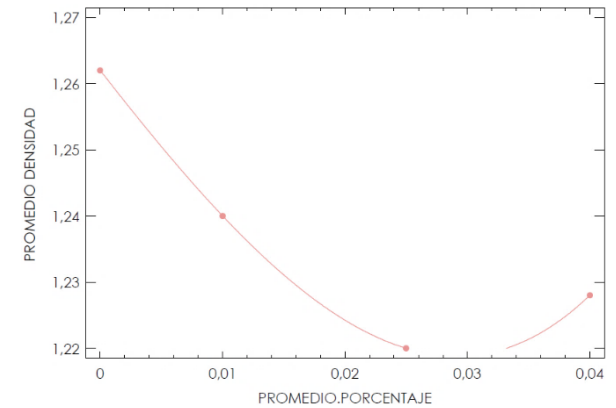
La densidad de la muestra va disminuyendo hasta un valor aproximado entre el 2,5% y el 3% de aditivo, para volver a aumentar progresivamente. Dicho comportamiento supone la capacidad de crear un material de mayor tamaño con menor carga de peso propio, es decir, un material aligerado. Con un peso menor, en este caso, con respecto a la probeta de referencia elaborada únicamente con yeso. Esto significa que en caso de que el resultado mecánico sea suficiente, hasta este último valor, se obtendrá una mejora en relación con su peso y su volumen ocupado o en relación con la superficie revestida.

A continuación, analizamos la [Gráfica 14] de regresión simple, que responde a la siguiente ecuación:

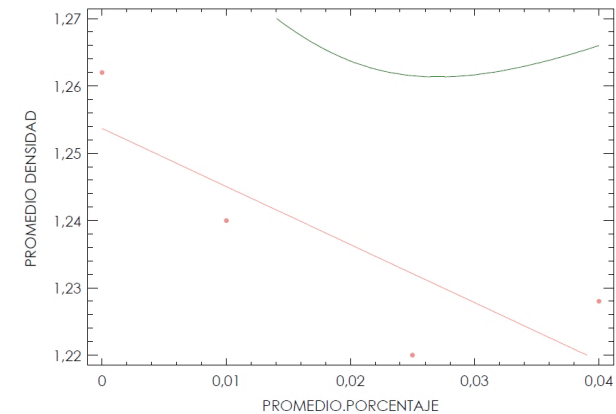
$$y = 1,25367 - 0,862585x$$

donde; $y =$ densidad $x =$ porcentaje de adición de PET

En este caso, el estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 68,1554% de la variabilidad en la densidad. El coeficiente de correlación es igual a -0,825563, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,0126373.



Gráfica 13. Modelo ajustado regresión polinomial de la densidad de cada grupo de muestras. Fuente: elaboración propia mediante programa Statgraphics.



Gráfica 14. Modelo ajustado regresión simple de la densidad de cada grupo de muestras. Fuente: elaboración propia mediante programa Statgraphics.



Imagen 78 Prensa multi-ensayo de 300kN Codein S.L., modelo MCO-30, número de serie 139. Fuente: elaboración propia.



Imagen 9. Complemento para el ensayo de resistencia de rotura a flexión. Fuente: elaboración propia.

06.1.4. Análisis de los resultados.

Resistencia a flexión

Las muestras realizadas anteriormente en el laboratorio se someten a resistencia a flexión, que consiste, según la norma UNE-EN-1515-11, en aplicar fuerza en la muestra hasta su rotura.

Para el ensayo de rotura, se emplea una prensa multi-ensayo de 300kN de la casa Codein S.L., modelo MCO-30, número de serie 139 [Imagen 8 y 9]. La fuerza se aplica sobre el lado longitudinal, hasta que la muestra se rompe. Posteriormente, se realizará una prueba de resistencia a compresión con las dos partes resultantes.

Los resultados del análisis de resistencia a flexión en nuestra probeta son los siguientes:

PORCENTAJE	PESO	FLEXIÓN		PORCENTAJE	PESO	FLEXIÓN	
PET	gr	Kgf	MPa	PET	gr	Kgf	MPa
0%	318,100	0,188	4,406	1%	320,380	0,197	4,617
0%	318,060	0,190	4,453	1%	317,500	0,174	4,078
0%	321,130	0,184	4,313	1%	312,220	0,146	3,422
0%	324,730	0,195	4,570	1%	313,360	0,157	3,680
0%	328,910	0,216	5,063	1%	323,250	0,179	4,195
0%	327,860	0,216	5,063	1%	317,180	0,176	4,125
MEDIAS	323,132		4,645	MEDIAS	317,315		4,020

PORCENTAJE	PESO	FLEXIÓN		PORCENTAJE	PESO	FLEXIÓN	
PET	gr	Kgf	MPa	PET	gr	Kgf	MPa
2,50%	308,670	0,162	3,797	4%	312,530	0,146	3,422
2,50%	311,820	0,163	3,820	4%	314,710	0,166	3,891
2,50%	315,490	0,142	3,328	4%	315,830	0,181	4,242
2,50%	311,400	0,143	3,352	4%	307,650	0,159	3,727
2,50%	313,130	0,153	3,586	4%	317,810	0,140	3,281
2,50%	313,950	0,166	3,891	4%	316,910	0,130	3,047
MEDIAS	312,410		3,629	MEDIAS	314,240		3,602

Tabla 10. Resultados resistencia a flexión de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

06. EXPERIMENTACIÓN

Se realiza un análisis unidimensional de la resistencia a flexión de cada tipo de probeta:

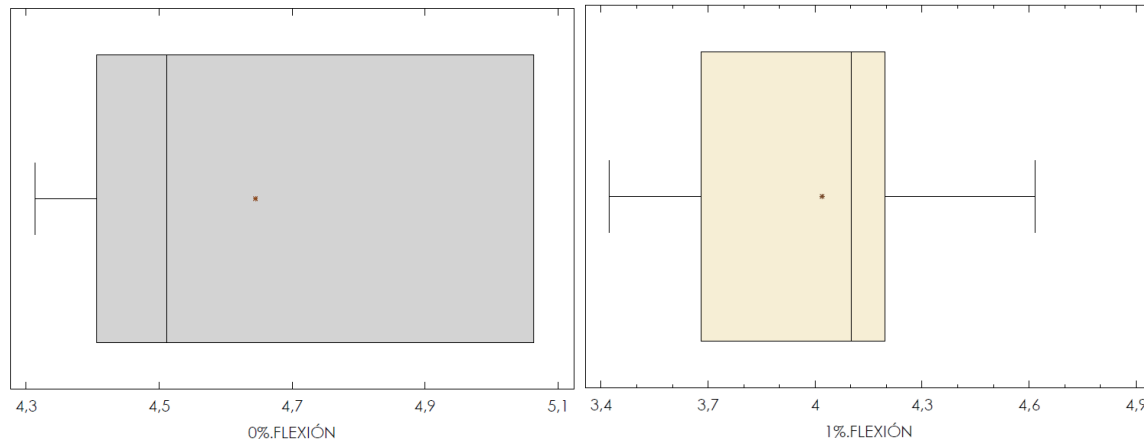


Diagrama 5. Resistencia flexión probetas 0% de PET.

Promedio = 4,64467

Desviación típica = 0,334449

Diagrama 6. Resistencia flexión probetas 1% de PET.

Promedio = 4,0195

Desviación típica = 0,41824

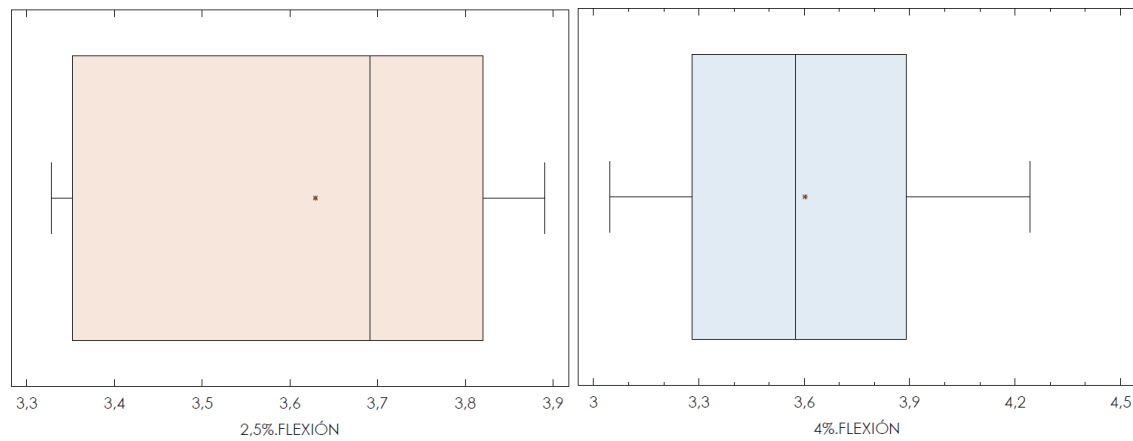


Diagrama 7. Resistencia flexión probetas 2,5% de PET.

Promedio = 3,629

Desviación típica = 0,245979

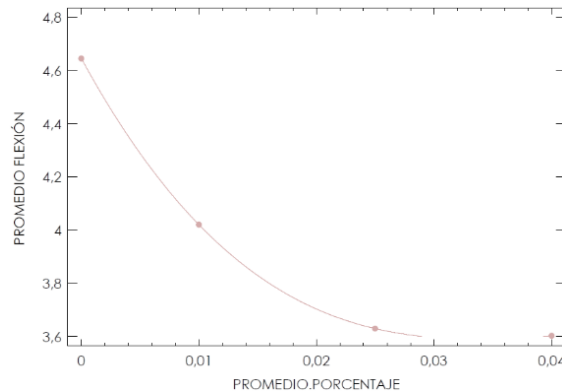
Diagrama 8. Resistencia flexión probetas 4% de PET.

Promedio = 3,60167

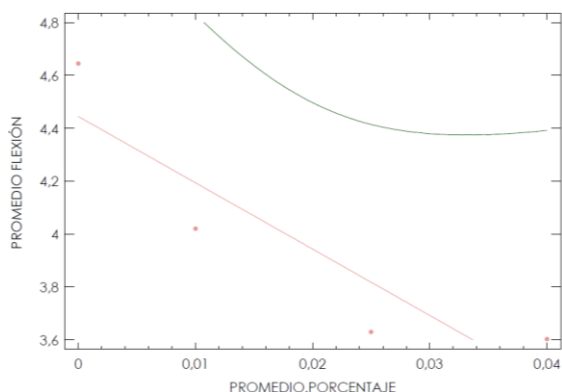
Desviación típica = 0,436397

PORCENTAJE PET	FLEXIÓN MEDIA MPa
0%	4,645
1%	4,020
2,5%	3,629
4%	3,602

Tabla 11. Resistencia a flexión media de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 15. Modelo ajustado regresión polinomial de la resistencia a flexión de cada grupo de muestras.



Gráfica 16. Modelo ajustado regresión simple de la resistencia a flexión de cada grupo de muestras. Fuente: elaboración propia mediante programa Statgraphics.

En las gráficas de caja y bigotes anteriores [Diagramas 5, 6, 7 y 8], observamos una mayor dispersión de resultados en la gráfica que corresponde a la muestra de referencia, seguida de la muestra con aditivo de PET en porcentaje del 1%, que puede deberse a una distribución menos homogénea de los trozos de PET debido a su menor cantidad en presencia dentro de la muestra.

Para estudiar los datos con mayor claridad y exactitud, realizamos una media de los resultados de resistencia a flexión de las probetas de cada grupo de muestras de distintos porcentajes [Tabla 11].

Observamos la [Gráfica 15] de regresión polinomial, con los datos de porcentaje de concentración de aditivo de PET y la flexión media de cada probeta. En ella se percibe un descenso pronunciado de la resistencia a flexión conforme se aumenta el porcentaje de fibras.

La disminución de la pérdida de resistencia a flexión del 4% con respecto al 2,5% es ínfima, en comparación al descenso que sufre con respecto al 1%, mostrándose en un valor aproximado del 3% el pico más bajo de la función cuadrática, que comienza a aumentar a partir del 4% de nuevo.

A continuación, analizamos la [Gráfica 16] de regresión simple, que responde a la siguiente ecuación:

$$y = 4,44431 - 25,083x$$

donde; y = resistencia a flexión x = porcentaje de adición de PET

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 81,4406% de la variabilidad en la resistencia a flexión. El coeficiente de correlación es igual a -0,902444, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0,25664.

06. EXPERIMENTACIÓN

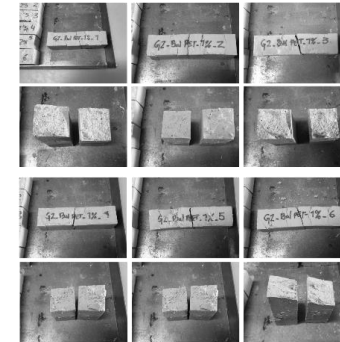


Imagen 10. Probetas con adición de 1% de hilos de PET.



Imagen 11. Probetas con adición de 2,5% de hilos de PET.

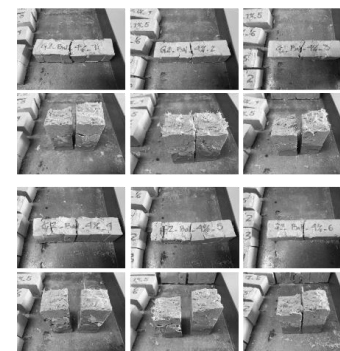


Imagen 12. Probetas con adición de 4% de hilos de PET.
Fuente: elaboración propia.

En las siguientes imágenes [Imagen 10, 11 y 12. Anexo] se muestra la rotura de las probetas tras someterse al ensayo de resistencia flexión.

Se observa una mayor uniformidad del aditivo en el 4% con respecto a las probetas del 2,5%, por lo que podemos destacar un comportamiento dúctil, el material se deforma, pero no llega a desprenderse gracias a la adición de hilos de PET que aportan unidad a la muestra.

Además existe un aumento proporcional de las grietas previas a la rotura conforme se aumenta el porcentaje de aditivo. Esto supone una rotura más dúctil que implica una mayor deformación no recuperable previo a la rotura. Esta propiedad otorga una ventaja en zonas de alta sismicidad debida a la capacidad de disipar este tipo de acciones sin llegar a colapsar.

Resistencia a compresión



Para el ensayo de la rotura a compresión, se utilizarán las dos partes de la probeta resultantes del ensayo de resistencia a flexión calculada anteriormente. En este proceso se le aplicará a cada parte de la muestra una fuerza rectangular de 4x4cm, siguiendo la norma UNE-EN-1515-11. Para el ensayo de rotura, se emplea una prensa multi-ensayo de 300kN de la casa Codein S.L., modelo MCO-30, número de serie 139 [Imagen 7 y 13].

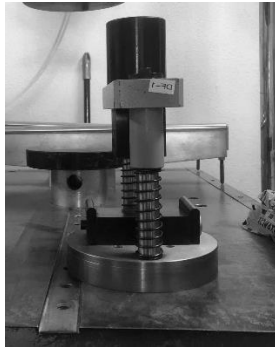
Los resultados del análisis de resistencia a compresión en cada mitad de nuestras probetas (A y B) son los siguientes. [Tabla 12]

PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN A KgF	COMPRESIÓN A MPa	COMPRESIÓN B KgF	COMPRESIÓN B MPa	PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN A KgF	COMPRESIÓN A MPa	COMPRESIÓN B KgF	COMPRESIÓN B MPa
0%	318,100	2,066	12,913	1,974	12,338	1%	320,380	1,568	9,800	1,151	7,194
0%	318,060	2,140	13,375	2,046	12,788	1%	317,500	1,468	9,175	1,310	8,188
0%	321,130	1,975	12,344	2,163	13,519	1%	312,220	1,308	8,175	1,537	9,606
0%	324,730	2,152	13,450	1,954	12,213	1%	313,360	1,399	8,744	1,540	9,625
0%	328,910	2,064	12,900	2,131	13,319	1%	323,250	1,386	8,663	1,628	10,175
0%	327,860	1,932	12,075	1,959	12,244	1%	317,180	1,486	9,288	1,307	8,169
MEDIAS	323,132		12,843		12,736	MEDIAS	317,315		8,974		8,826

PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN A KgF	COMPRESIÓN A MPa	COMPRESIÓN B KgF	COMPRESIÓN B MPa	PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN A KgF	COMPRESIÓN A MPa	COMPRESIÓN B KgF	COMPRESIÓN B MPa
2,50%	308,670	1,443	9,019	1,215	7,594	4%	312,530	1,059	6,619	1,068	6,675
2,50%	311,820	1,243	7,769	1,351	8,444	4%	314,710	1,096	6,850	1,078	6,738
2,50%	315,490	1,368	8,550	1,172	7,325	4%	315,830	1,091	6,819	1,022	6,388
2,50%	311,400	1,045	6,531	1,306	8,163	4%	307,650	1,022	6,388	1,112	6,950
2,50%	313,130	1,433	8,956	1,430	8,938	4%	317,810	1,127	7,044	1,160	7,250
2,50%	313,950	1,259	7,869	1,371	8,569	4%	316,910	1,080	6,750	1,137	7,106
MEDIAS	312,410		8,116		8,172	MEDIAS	314,240		6,745		6,851

Imagen 7. Prensa multi-ensayo de 300kN Codein S.L., modelo MCO-30, número de serie 139. Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Resultados resistencia a compresión de las mitades de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.



Para analizar los datos de forma conjunta y pronosticar una tendencia global del material propuesto, se realiza una media de los resultados de resistencia a compresión de ambas partes de cada muestra, con el fin de obtener el resultado global de las probetas. [Tabla 13]

PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN MPa	PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN MPa	PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN MPa	PORCENTAJE PET	PESO gr	COMPRESIÓN MPa
0%	318,100	12,625	1%	320,380	8,497	2,50%	308,670	8,306	4%	312,530	6,647
0%	318,060	13,081	1%	317,500	8,681	2,50%	311,820	8,106	4%	314,710	6,794
0%	321,130	12,931	1%	312,220	8,891	2,50%	315,490	7,938	4%	315,830	6,603
0%	324,730	12,831	1%	313,360	9,184	2,50%	311,400	7,347	4%	307,650	6,669
0%	328,910	13,109	1%	323,250	9,419	2,50%	313,130	8,947	4%	317,810	7,147
0%	327,860	12,159	1%	317,180	8,728	2,50%	313,950	8,219	4%	316,910	6,928
MEDIAS	323,132	12,790	MEDIAS	317,315	8,900	MEDIAS	312,410	8,144	MEDIAS	314,240	6,798

Imagen 13. Complemento para el ensayo de resistencia a compresión. Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Resultados resistencia a compresión media de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

06. EXPERIMENTACIÓN

Se realiza un análisis unidimensional de la resistencia a compresión media de cada tipo de probeta:

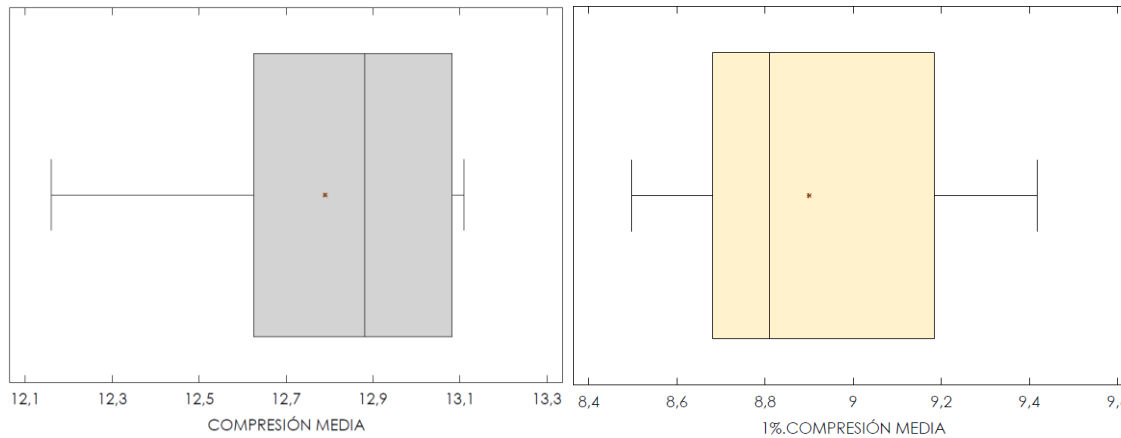


Diagrama 9. Resistencia compresión probetas 0% de PET. Diagrama 10. Resistencia compresión probetas 1% de PET.

Promedio = 12,7893

Desviación típica = 0,355918

Promedio = 8,9

Desviación típica = 0,343526

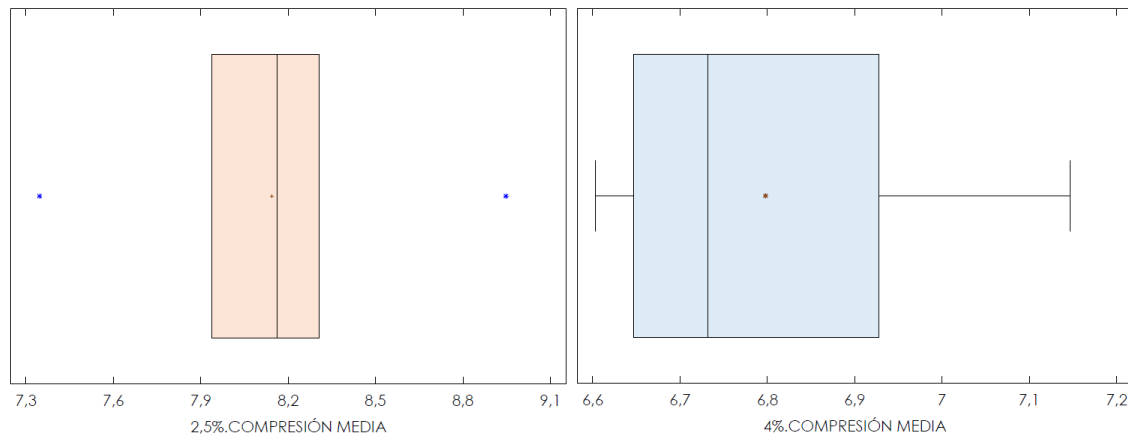


Diagrama 11. Resistencia compresión probetas 2,5% de PET. Diagrama 12. Resistencia compresión probetas 4% de PET.

Promedio = 8,14383

Desviación típica = 0,520724

Promedio = 6,798

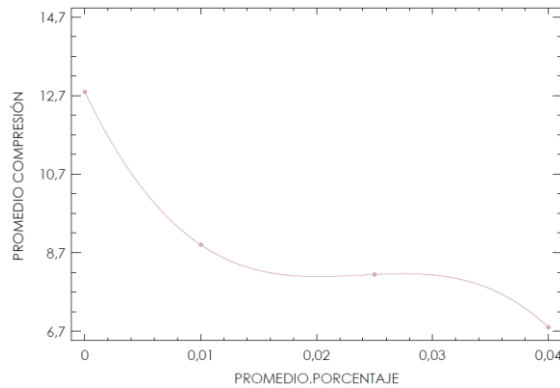
Desviación típica = 0,207935

En las gráficas de caja y bigotes anteriores [Diagramas 9, 10, 11 y 12], observamos una mayor dispersión de resultados en el diagrama que corresponde a la muestra con aditivo de 2,5% de PET, bastante por encima del resto de porcentajes.

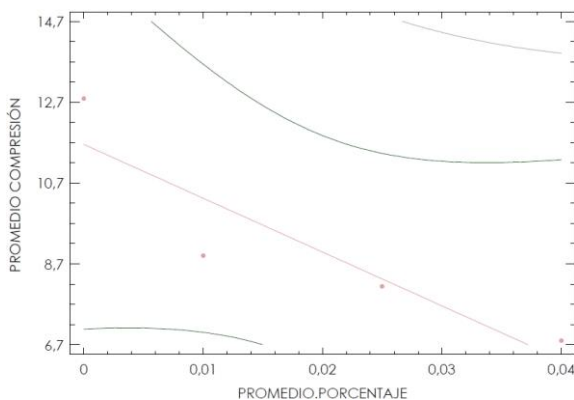
Para estudiar los datos con mayor claridad y exactitud, realizamos una media de los resultados de resistencia a flexión de las probetas de cada grupo de muestras de distintos porcentajes. [Tabla 14]

PORCENTAJE PET	COMPR. A MEDIA MPa	COMPR. B MEDIA MPa	MEDIA COMPRESIÓN MPa
0%	12,843	12,737	12,790
1%	8,974	8,826	8,900
2,5%	8,116	8,172	8,144
4%	6,745	6,851	6,798

Tabla 14. Resistencia a compresión media de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 17. Modelo ajustado regresión polinomial de la resistencia a compresión de cada grupo de muestras.



Gráfica 18. Modelo ajustado regresión simple de la resistencia a compresión de cada grupo de muestras. Fuente: elaboración propia mediante Statgraphics.

Observamos la [Gráfica 17] de regresión polinomial, con los datos de porcentaje de concentración de aditivo de PET y la compresión media de cada probeta. En ella se percibe un comportamiento diferente con respecto a las gráficas que se han analizado anteriormente en este apartado.

La disminución de la pérdida de resistencia a flexión del 4% con respecto al 2,5% es ínfima, en comparación al descenso que sufre con respecto al 1%, sin embargo, es en el 4% cuando se muestra un descenso considerable con una proyección descendente. En general, podemos observar una disminución de la resistencia a compresión a medida que aumenta el porcentaje del aditivo de PET.

A continuación, analizamos la [Gráfica 18] de regresión simple, que responde a la siguiente ecuación:

$$y = 11,6545 - 133,148x$$

donde; y = resistencia a compresión x = porcentaje de adición de PET

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 82,0317% de la variabilidad de la resistencia a compresión. El coeficiente de correlación es igual a -0,905713, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 1,33562.

06. EXPERIMENTACIÓN

06.1.5. Conclusiones del ensayo.

Se observa una disminución general de las capacidades mecánicas proporcional al aumento del aditivo de PET, aunque su variación en los distintos esfuerzos es diferente como se puede observar en los ensayos de flexión y compresión.

En cuanto a la rotura de probetas, se observa una mayor uniformidad del material en las probetas del 2,5% de aditivo, con una sola rotura central y con apenas grietas.

Ademas existe un aumento proporcional de las grietas previas a la rotura conforme se aumenta el porcentaje de aditivo. Esto supone una rotura más dúctil que implica una mayor deformación, previa a la rotura, no recuperable. Esta propiedad otorga una ventaja en zonas de alta sismicidad debida a la capacidad de disipar este tipo de acciones sin llegar a colapsar.

En la [Tabla 15] comprobamos el porcentaje de reducción de los resultados mecánicos de las probetas con aditivo con respecto a la probeta de referencia. Para los valores de compresión, se reflejan unos valores similares sobre el 1% y el 2,5% de aditivo. Sin embargo, es en el 4% cuando se muestra un descenso considerable en las propiedades de resistencia a flexión y a compresión.

En las probetas con un aditivo de PET del 4% observamos como en la resistencia a flexión, el valor del porcentaje de reducción es similar, con respecto a la muestra sin aditivo, que en el caso del 2,5%. Aun así, se ha observado una rotura más dúctil en el caso del mayor porcentaje de aditivo de PET.

En el caso de que la sollicitación de una mayor resistencia a compresión sea necesaria, entonces nos decantaríamos por el valor del 2,5%, puesto que supone una reducción de porcentaje mucho menor que en el caso de las probetas con aditivo del 4%, en este aspecto.

PORCENTAJE PET	PESO MEDIO gr	DENSIDAD MEDIA gr/cm3	FLEXIÓN MEDIA MPa	COMPRESIÓN MEDIA MPa
0%	323,132	1,262	4,645	12,790
1%	317,315	1,240	4,020	8,900
2,5%	312,410	1,220	3,629	8,144
4%	314,240	1,228	3,602	6,798

PORCENTAJES DE REDUCCIÓN CON RESPECTO A LA REFERENCIA				
1%	1,8%	1,5%	13,5%	30,4%
2,5%	3,3%	3,3%	21,9%	36,3%
4%	2,8%	2,7%	22,5%	46,9%

Tabla 15. Tabla resumen de los resultados mecánicos y porcentaje de reducción con respecto a la muestra. Fuente: elaboración propia.

07. PROPUESTA Y DISEÑO DE PRODUCTO.

La última parte de este trabajo de investigación se centrará en el desarrollo de un producto de aplicación en el sector de la construcción empleando el residuo estudiado y basándonos en las conclusiones de los resultados obtenidos. Lo que nos permite, entre otros, una reducción de contaminación por residuos a nivel mundial.

Tras las conclusiones obtenidas a partir de los ensayos realizados en este trabajo de investigación, el producto a proponer se tratará de placas de yeso aligeradas con hilos de polietileno tereftalato aplicadas a falsos techos continuos, que además de proporcionar la característica aligerante antes mencionada, también aporta un comportamiento dúctil a las placas de yeso, que puede aplicarse en el caso de edificios en zonas con riesgo sísmico, provocando grietas en la superficie del yeso, que no llegan a provocar desprendimientos del material que afecten a la seguridad de los ocupantes del edificio de aplicación.

El porcentaje de aditivo que se va a utilizar, en este caso es la adición del 2,5% o 4% que, como hemos comprobado en el ensayo, supondría una notable reducción del peso de las placas, en torno al 3,3% con respecto a la probeta de yeso sin aditivo [Tabla 15; apartado 06.1.5.], y que, aunque tanto la resistencia a flexión como la resistencia a compresión vean también reducidas sus capacidades, siempre es dentro de un valor asumible, aportando, además, una mejora en el comportamiento ante movimientos sísmicos, como hemos comprobado tras la rotura de probetas en el laboratorio.

Además de lo anteriormente mencionado, la implementación de un material reciclado en productos de un sector tan contaminante como es la construcción supone una gran ventaja para el medio ambiente, participando en la economía circular de los plásticos y contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental producida la obtención de las materias primas y su posterior tratamiento. Con lo que también se considera la inclusión de la mayor cantidad de material reciclado como un factor diferencial de mejora.

De este modo, se propone sistema de revestimiento horizontal de un forjado, techo suspendido continuo, compuesto por una estructura metálica que se coloca en dos direcciones, la primaria y la secundaria, a la que se le atornillan placas de yeso con aditivo de hilos de polietileno tereftalato. Las placas utilizadas serán de igual dimensiones que las placas comerciales, 1200 x 2000 mm, para así adaptarnos a los sistemas de techos suspendidos existentes en el mercado.

07. PROPUESTA Y DISEÑO DE PRODUCTO

Tras el estudio realizado, se ha comprobado que actualmente en España, para la instalación de techos suspendidos continuos, se utilizan placas de yeso laminado, envueltas por dos paneles de cartón-yeso, tanto en la cara superior como en la inferior, y que para mejorar las condiciones y características del yeso se utilizan aditivos de fibra de vidrio y agregado de aligerante. Productos que tienen un fuerte impacto medioambiental, bien por su proceso de extracción y fabricación o bien por sus componentes químicos.

La materia prima que se consume por parte del sector de la construcción tiene como consecuencia el aumento en la generación de residuos y el consumo energético para la fabricación de materiales destinados a tal fin, la industria de la construcción genera el 35% de residuos industriales en el mundo [Referencia 13].

En el caso del yeso laminado, en el proceso de extracción de 1 tonelada de dicha materia prima, se consumen unos 800 litros de agua, y se invierten 6279,13 MJ de energía y 359,13 kg de CO₂. [Referencia 15]

Tomando como punto de partida las pautas establecidas anteriormente, se procede a comparar el producto propuesto de placas de yeso aligeradas con aditivo de hilos de polietileno tereftalato, con un producto comercial de similares características.

En este caso optamos por un sistema de revestimiento horizontal de un forjado por su parte inferior, formado por una estructura metálica sobre la que se atornilla una o más placas de yeso laminado, de la marca comercial Knauf. Concretamente el techo suspendido Knauf D113 [Imagen 14], compuesto por una estructura doble de maestras CD 60/27 colocadas al mismo nivel, a la que se le atornillarán una o más placas de yeso laminado. [Anexo, ficha técnica]

Para dicho sistema, Knauf propone la instalación de la placa Lightboard Horizon A [Imagen 15], con juntas en cruz en ambos sentidos, logrando una superficie plana y lista para alcanzar altas exigencias de acabado. El tratamiento de juntas se realiza con cinta y pasta de juntas en polvo tipo Knauf Unik. Las placas se deben colocar en sentido transversal a los perfiles secundarios. [Anexo, ficha técnica]

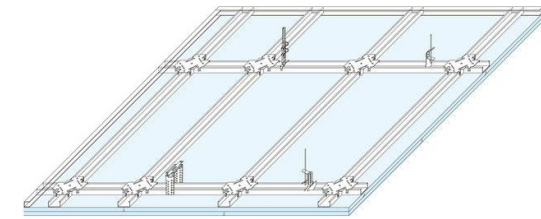


Imagen 14. Techo suspendido continuo Knauf D113.
Fuente: catálogo sistemas Knauf.



Imagen 15. Placa de yeso laminado Lightboard Horizon A.
Fuente: catálogo productos Knauf.

La placa de yeso laminado Knauf elegida para la comparativa presenta unas dimensiones de 1200 x 2000 mm con un espesor de 12,5 mm. Su peso nominal es aproximadamente de 6,5 kg/m² y tiene una densidad de 520 kg/m³. En cuanto a la carga de rotura a flexión, se realizan dos ensayos según UNE-EN 520, el primero con una carga de 550 N y rotura longitudinal, el segundo con carga de 210 N y rotura transversal. [Imagen 16]

Dicha placa está reforzada mediante dos paneles de cartón-yeso que recubren tanto su cara superior como la inferior, reforzando la resistencia de rotura del yeso. Además, para mejorar las condiciones y características de la materia prima se utilizan aditivos de fibra de vidrio y agregado de aligerante.

A partir de los datos mencionados, según la UNE-EN 196-1, procedemos al cálculo de la resistencia a flexión, en megapascals, de la placa de yeso Knauf, mediante la siguiente fórmula:

$$R = \frac{1,5 \times F \times L}{b^3}$$

donde;

R = resistencia a flexión (MPa)

b = lado de la sección cuadrada (mm)

F = carga aplicada en la rotura (N)

L = distancia entre soportes (mm)

Para aplicar la fórmula anterior al caso de una placa de yeso, en vez de a una probeta de ensayo, utilizamos la ley del momento de inercia para obtener:

$$R = \frac{1,5 \times F \times L}{b^3} = 1,5F \frac{L}{b^3} \frac{b/12}{b/12} = 1,5F \frac{L b}{I} \frac{1}{12} = 1,5F \frac{L b}{h^3 b/12 \times 12} = 1,5F \frac{L}{h^3}$$

Sustituyendo con los datos característicos de la placa de yeso laminado de Knauf, y teniendo en cuenta que, la distancia entre los apoyos, es decir 500 mm, obtenemos que la resistencia a flexión de ésta es de:

$$R = 1,5F \frac{L}{h^3} = 1,5 \times 550 \frac{500}{12,5^3} = 211,2 \text{ MPa}$$

Datos técnicos

Descripción	Unidad	Valor
Tipo de placa	-	A Operaciones a) y b)
Reacción al fuego UNE-EN 13501-1	Clase	A2-s1,d0 (C.2)
Tolerancia de anchura	mm	+0 / -4
Tolerancia de longitud	mm	+0 / -5
Tolerancia de espesor	mm/m	+0,5 / -0,5
Tolerancia de ortogonalidad	mm/m	≤ 2,5
Factor de resistencia al vapor de agua μ: Seco Húmedo	-	10 4
Conductividad térmica λ	W/(m K)	≤ 0,21
Densidad	kg/m ³	≥ 520
Peso (nominal)	kg/m ²	aprox. 6,5
Carga de rotura a flexión longitudinal: transversal:	N	≥ 550 ≥ 210

Medidas y embalaje

Descripción	Anchura mm	Longitud mm	Espesor mm
Lightboard Horizon 4BA	1200	2000	12,5
	1200	2500	12,5

Imagen 16. Extracto ficha técnica de yeso laminado Lightboard Horizon A. Fuente: catálogo productos Knauf.

07. PROPUESTA Y DISEÑO DE PRODUCTO

Para comparar las placas del yeso estudiado reforzado con aditivo de hilos de polietileno tereftalato en proporciones del 2,5 y 4%, con la placa de yeso comercial de Knauf, debemos calcular los espesores de cada uno de ellos y tomando los datos de carga de rotura y distancia máxima del fabricando. Se tiene en cuenta que la resistencia a flexión del yeso con aditivo del 2,5% (h_1) es de 3,63 MPa y la del yeso con aditivo en 4% (h_2) es de 3,60 MPa, calculadas en el apartado 06. [Tabla 11]

$$h_1 = \sqrt[3]{1,5 \text{ FL/R}} = \sqrt[3]{1,5 \times 550 \times 500 / 3,63} = 48,44 \text{ mm}$$

$$h_2 = \sqrt[3]{1,5 \text{ FL/R}} = \sqrt[3]{1,5 \times 550 \times 500 / 3,60} = 48,57 \text{ mm}$$

Como se suponía, la placa de menor espesor, 48,44 mm, sería la reforzada con aditivo de hilos de PET en porcentaje del 2,5%, que tiene la mayor resistencia a flexión. Si embargo, los resultados obtenidos son mucho mas elevados que los 12,5 mm de espesor que tiene la placa de yeso de Knauf, suponemos entonces, que al estar reforzada en sus caras por paneles de cartón-yeso que aportan una mayor resistencia, su espesor disminuye considerablemente.

Realizamos la hipótesis de calcular el espesor real que tendrían dichas placas sin el refuerzo de cartón, gracias a un estudio realizado sobre el análisis de los refuerzos mixtos de fibras de vidrio E y fibras AR en yeso, [Referencia 18], “De los resultados se deduce que la resistencia a flexión aumenta con el porcentaje de fibras añadidas a la matriz, siempre que se consiga una dispersión homogénea de las mismas y con el aumento de la longitud de las fibras. Se destacan los compuestos de fibra de vidrio en porcentaje del 2% con fibras de longitudes 25 y 50 mm, con un incremento en la resistencia a flexión del yeso entre el 2 y el 7%.”

Suponiendo que el incremento es del 7% sobre los 4,65 MPa de resistencia a flexión del yeso sin aditivo, valor calculado tras la realización de ensayos mencionados en el apartado 06 [Tabla 11], obtenemos una resistencia de 4,98 MPa. Despejando en la fórmula anterior:

$$h_0 = \sqrt[3]{1,5 \text{ FL/R}} = \sqrt[3]{1,5 \times 550 \times 500 / 4,98} = 43,6 \text{ mm}$$

Por tanto, la placa de yeso laminado de Knauf sin el esfuerzo provocado por los paneles de cartón dispuestos a ambas caras, tendría unos 44 mm de espesor aproximado.

PORCENTAJE PET	FLEXIÓN MEDIA MPa
0%	4,645
1%	4,020
2,5%	3,629
4%	3,602

Tabla 11. Resistencia a flexión media de las probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

Partimos de la hipótesis de que, añadiendo dichos paneles de cartón a ambas caras de la placa de yeso aligerada con hilos de PET, su resistencia a flexión aumentaría considerablemente, siendo posible reducir su espesor para no sobrepasar los 25 mm de máximo que indica el fabricante Knauf.

Con los datos obtenidos anteriormente, se obtiene que el espesor de la placa de yeso con aditivo del 2,5% de hilos de polietileno tereftalato propuesta, añadiendo paneles de cartón a ambas caras, para que tenga las mismas exigencias de resistencia a flexión que la placa de Knauf, sería de:

$$h'_1 = 48,44 \text{ mm} \frac{12,5 \text{ mm}}{43,6 \text{ mm}} = 13,89 \text{ mm}$$

Aproximamos a un espesor de placa de 14 mm, totalmente asumible para los sistemas de techo suspendido comerciales.

En términos de peso y densidad, la placa de yeso comercial tiene unas características de 520 kg/m³ de densidad y aproximadamente 6,5 kg/m² de densidad superficial. Como la superficie de dicha placa es de 2,4 m², el peso nominal de cada placa de yeso Knauf será de 15,6kg.

Teniendo en cuenta el estudio mencionado anteriormente [Referencia 18], se realiza la hipótesis de que la fibra de vidrio se encuentra en un porcentaje del 2% y 0,02% de aligerante, que equivale a una densidad superficial de:

$$d_{FV} = 6,5 \frac{2}{100} = 0,13 \text{ kg/m}^2 \qquad d_A = 6,5 \frac{0,2}{100} = 0,013 \text{ kg/m}^2$$

Al saber que la superficie de la placa de Knauf es de 2,4m², se obtiene la cantidad de fibra de vidrio en peso que tendría cada placa comercial, que sería de 0,312kg, y 0,031kg la cantidad de peso del aligerante.

07. PROPUESTA Y DISEÑO DE PRODUCTO

De los resultados anteriores se estima que de los 15,6 kg de peso de la placa comercial de Knauf, la cantidad de 15,25 kg correspondería al peso del yeso y el restante a la adición de fibras de vidrio y aligerante.

A continuación, partiendo de la base de que la placa de Knauf tiene una densidad superficial de 6,5 kg/m² y un volumen de 0,03m³, se calcula la cantidad de yeso en peso que tendría la placa propuesta.

Al tener esta un volumen mayor, de 0,0336 m³, se optima que su densidad superficial sea:

$$d = 0,0336 \frac{6,5}{0,03} = 7,3 \text{ kg/m}^2$$

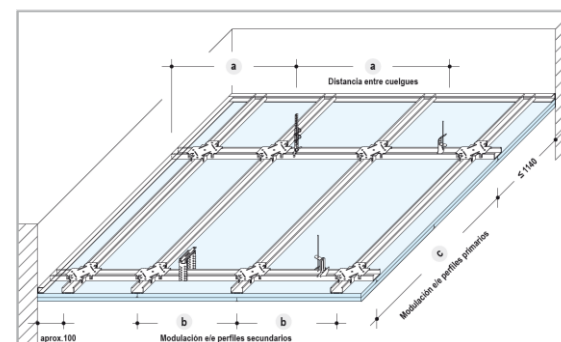
A partir de entonces, podemos obtener el peso nominal de la placa de yeso propuesta, que sería de 17,5 kg.

De los resultados anteriores, se realiza la estimación que, de los 17,5 kg de peso de la placa, la cantidad de un 3,3% de reducción, correspondería al peso del yeso, lo que equivale a 0,6kg de hilos de polietileno tereftalato y 16,9 kg de yeso en cada placa propuesta.

Se comprueba que, debido a que la placa propuesta tiene un espesor ligeramente mayor que la placa comercial, y que además no presenta el aditivo de aligerante, obtenemos que su peso nominal es mayor, y que, por tanto, presenta mayor cantidad de yeso.

Aun entonces, estaríamos sustituyendo el refuerzo de fibras de vidrio y dicho aligerante, productos altamente contaminantes, por un material reciclado, produciendo grandes beneficios y reduciendo el impacto medioambiental, del producto constructivo estudiado.

Por todo lo mencionado en este apartado, se proponen placas de yeso laminado con aditivo de hilos de polietileno tereftalato en una proporción del 2,5% con respecto al peso del yeso, es decir, utilizando 0,60kg de hilos de PET en cada una de ellas. Dichas placas irán ancladas a un sistema de techo suspendido Knauf con estructura metálica CD 60/27 al mismo nivel. La distancia entre cuelgues primarios será de 1200 mm, y a los secundarios de 550 mm. [Figura 8]



Distancia entre Primarios c	Distancia entre Cuelgues a Rango kN/m ² (Ver página 2)		
	≤ 0,15	≤ 0,30	≤ 0,50 ¹⁾
1200	1100	-	-
	-	650	-
	-	-	650

Espesor placa mm	Placa Transversal a los secundarios mm	b
12,5 / 2x12,5	500	En caso de protección al fuego, ver otras soluciones en página 13
15	550	
18	600	

Figura 8. Esquema y características del techo suspendido Knauf D113. Fuente: catálogo técnico fabricante Knauf.

ESQUEMA DE FABRICACIÓN DE LA LANA DE VIDRIO

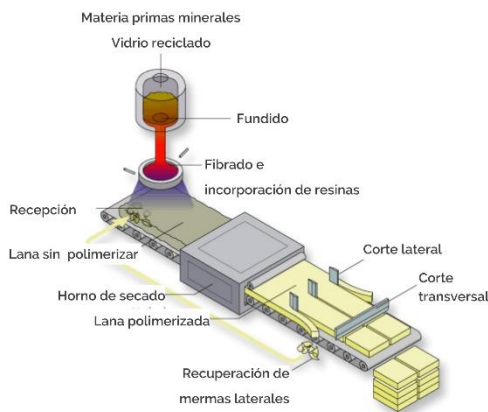


Figura 9. Esquema de fabricación de lana de vidrio. Fuente: declaración ambiental de producto.



Figura 10. Interpretación del ACV de fabricación de lana de vidrio. Fuente: declaración ambiental de producto.

07.1. Conclusiones de la comparativa

Con la propuesta de producto, se van a sustituir los componentes de fibra de vidrio y aligerante que componen las placas de yeso del mercado, altamente contaminantes, por un sustituto reciclable que aporta características similares a ambos materiales, puesto que los hilos de polietileno tereftalato, procedentes de balones deportivos, aligeran las placas de yeso sin necesidad de aligerante químico, así como mejoran el comportamiento dúctil de dicho material, favorable ante sismos.

La etapa de producción de la fibra de vidrio [Figura 9] comprendida entre los módulos de suministro de materias primas, transporte y fabricación, es la que presenta un mayor impacto al contribuir al calentamiento global, consumo de recursos no renovables, puesto que la materia prima de la que se extrae es arena silícea, consumo de energía, debido a las altas temperaturas del proceso de fundido que alcanzan los 1450º, y consumo de agua. [Figura 10] La producción de residuos se atribuye principalmente a la etapa de Fin de Vida. Esto es debido a que el 100% del producto se deposita en vertedero al final de su vida útil.

Con la solución propuesta, estaríamos ahorrando 0,13 kg de fibra de vidrio por cada m² de placas Knauf que dispusiéramos.

Por último, procedemos al cálculo de cuántos balones serían reciclados en cada placa propuesta. Teniendo en cuenta que cada balón pesa entre 410gr y 450gr, suponemos un peso de la capa interior formada por hilos de polietileno tereftalato de 80gr. Cada placa propuesta necesita un total de 0,6kg de hilos de polietileno, que equivaldría a 7 balones y medio, que se estarían reutilizando de manera ecoeficiente.

Por otro lado, aunque las placas comerciales existentes ya se encuentren recubiertas por paneles de cartón, precisamente para evitar la rotura o desprendimiento de la placa de yeso, en nuestro caso dicho sistema estaría doblemente protegido debido a la característica dúctil que le proporciona al yeso los hilos de polietileno tereftalato, proporcionando así mucha más resistencia del sistema frente al sismo.

Producto	Dimensiones m	Densidad superficial kg/m ²	Peso / placa kg	Yeso / placa kg
Placa Knauf Horizon A	2,00x1,20x0,0125	5,60	15,60	15,25
Placa yeso 2,5% aditivo	2,00x1,20x0,0139	7,30	17,50	16,90

Tabla 12. Resumen comparativa placa Knauf Horizon A con placa de yeso propuesta. Fuente: elaboración propia.

08. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO.

Tras haber definido previamente el producto propuesto, sistema de techo suspendido continuo con placas de yeso aligeradas con hilos de polietileno tereftalato, formado por una estructura metálica doble, se procede a aplicar la solución a un espacio arquitectónico existente.

Para la elección del tipo de espacio nos basamos en una serie de requisitos para que se vean aprovechadas las características del producto a proponer. En este caso, la adición de hilos de polietileno tereftalato al yeso, provoca un comportamiento dúctil a las placas de yeso, que puede aplicarse en el caso de edificios en zonas con riesgo sísmico, provocando grietas en la superficie del yeso, que no llegan a provocar desprendimientos del material que afecten a la seguridad de los ocupantes del edificio de aplicación. Además de aportar ligereza al sistema.

Por todo ello, se decide como espacio de aplicación, un edificio de pública concurrencia situado en zona con alto riesgo sísmico, como es el caso de la ciudad de Granada, una de las zonas de mayor actividad sísmica de la península ibérica [Figura 7], debido a la colisión de las placas continentales de África y Eurasia, que cada año se aproximan de cuatro a cinco milímetros.

Se centrará la aplicación, por reunir los requisitos mencionados, en el espacio arquitectónico de la Escuela de Arquitectura de Granada. Situada en el barrio del Realejo, en el extremo sudeste del casco histórico de la ciudad, en un conjunto arquitectónico que en otros tiempos sirvió como Hospital Militar.

La actual sede de la Escuela de Arquitectura de Granada ha sido foco de múltiples transformaciones a lo largo de los siglos, desde Palacio renacentista, a Escuela Nacional y Hospital Militar, hasta que en la década de los 90 pasó a ser la sede de la Escuela de Arquitectura de Granada.

La última rehabilitación fue llevada a cabo en 2015 por Víctor López Cotelo. Rescatando el orden tipológico del modelo conventual de doble claustro con un cuerpo central que resuelve los accesos y la distribución, integrando los dos lados del conjunto —que se desarrollan en torno a los dos patios— tanto de manera horizontal como vertical. Para alcanzar esta nueva unidad en el proyecto, han sido necesarias diversas intervenciones relacionadas con la conservación histórica, la rehabilitación y reforma interior de varios de los cuerpos preexistentes y pequeñas demoliciones, además de las construcciones de obra nueva.

Actualmente cuenta con una superficie construida de 13.785 m².

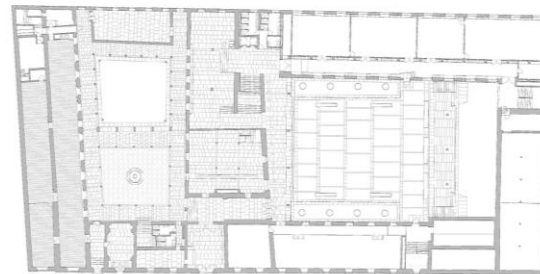
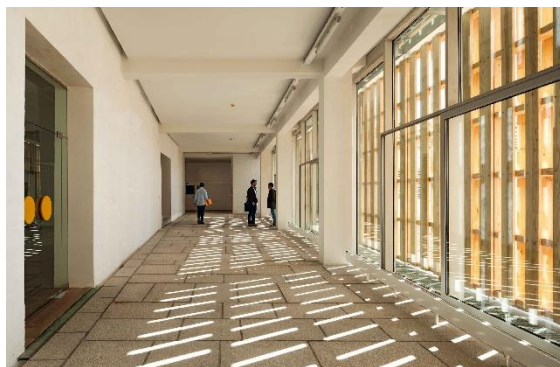


Figura 7. Mapa de peligrosidad sísmica. Fuente: Norma de construcción sismorresistente (NCSE-02).

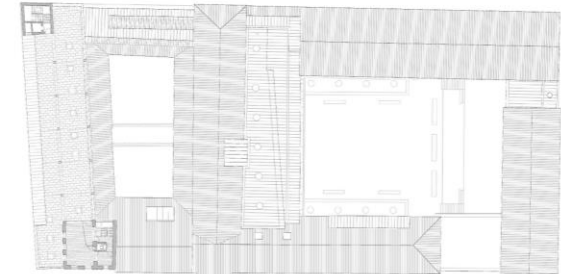


Imagen 16. Vista aérea Escuela de Arquitectura de Granada. Fuente: Lluís Casals.

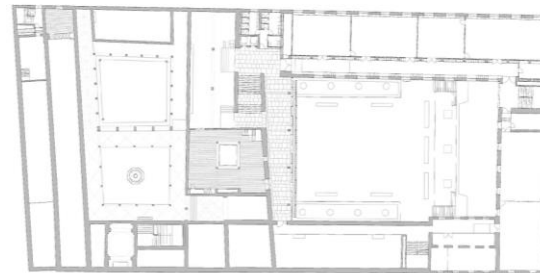
A continuación, se adjunta planimetría del edificio:



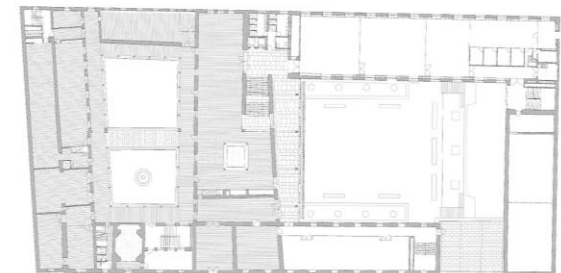
Planta baja Ground floor



Planta bajo cubiertas Floor below roofs



Planta semisótano Lower-ground floor



Planta principal Main level



0 5 30

Figura 11. Planimetría y sección longitudinal Escuela de Arquitectura de Granada. Fuente: Arquitectura Viva.

Imágenes 17, 18 y 19. Fotografías interior y exterior Escuela de Arquitectura de Granada. Fuente: Lluís Casals.

Debido a las características del producto propuesto, y a su comportamiento dúctil en caso de sismo, apareciendo grietas en la superficie del yeso, que no llegan a provocar desprendimientos del material que afecten a la seguridad de los ocupantes, se decide aplicar en aquellas zonas que se encuentren habitualmente ocupadas, como aulas, sala de conferencias y salas de estudio, así como pasillos que formen parte del recorrido de evacuación en caso de sismo.

Dicho esto, se han seleccionado los espacios de aplicación del producto propuesto, que corresponden a aulas, sala de conferencias, despachos, salas de estudio y pasillos que permitan la evacuación de los ocupantes hacia el exterior en caso de sismo. [Figura 12]

Tras la selección de espacios para la aplicación del sistema de techo suspendido, se implantará en una superficie total de 5235 m² de los 13785 m² que configuran el edificio completo.

Teniendo en cuenta que la superficie de cada placa es de 2,4 m², se necesitarán un total de 2185 placas de yeso con aditivo de polietileno de tereftalato.

El sistema por el que se implantarán las placas propuestas consistirá en una estructura metálica con maestras dispuestas al mismo nivel, a las que se le atornillarán las placas de yeso propuestas en esta investigación, para formar un sistema de techo suspendido Knauf. La distancia entre cuelgues primarios será de 1200 mm, y a los secundarios de 550 mm, y las uniones se formarán con empalmes en cruz. [Figuras 14, 15 y 16]

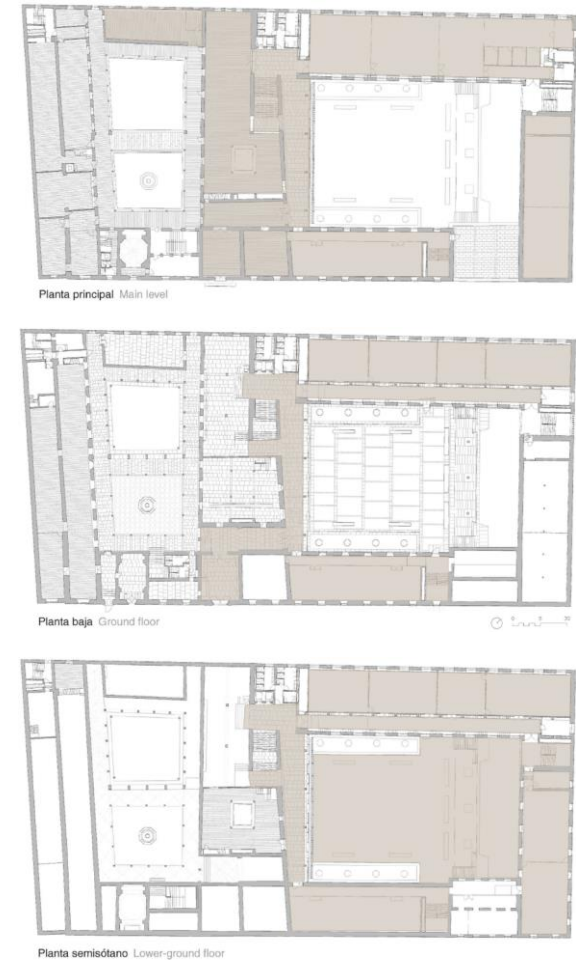
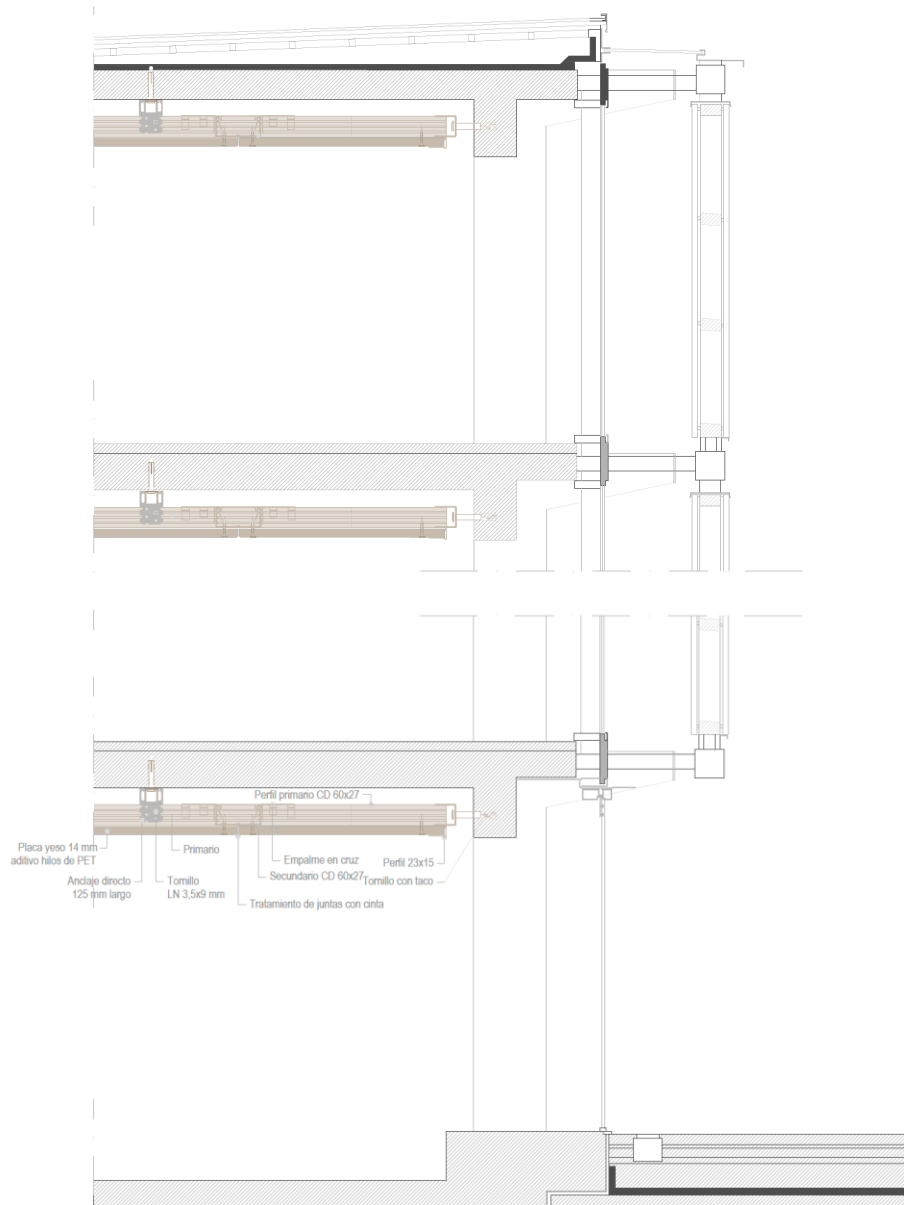


Figura 12. Planimetría recintos donde aplicar sistema de techo suspendido en Escuela de Arquitectura de Granada. Fuente: Elaboración propia.

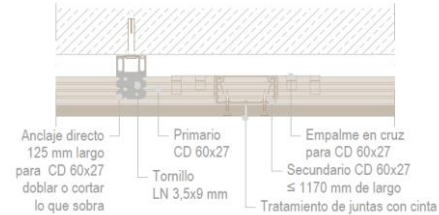
Se adjunta sección constructiva del edificio con el sistema de techo suspendido propuesto:



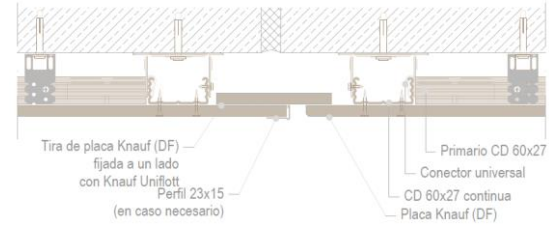
Encuentro con Muro. Junta Vista



Junta Transversal



Junta de Dilatación. Con Resistencia al Fuego



Figuras 14, 15 y 16. Detalles de encuentros instalación de techo suspendido propuesto en el edificio de Escuela de Arquitectura de Granada. Fuente: catálogo técnico Knauf.

Figura 13. Sección vertical con instalación de techo suspendido propuesto en el edificio de Escuela de Arquitectura de Granada. Fuente: Elaboración propia.

08. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

08.1. Impacto medioambiental de la propuesta

Tras comprobar que la placa ecoeficiente cumple las exigencias técnicas básicas de una placa comercial, la consideramos tan óptima para su aplicación práctica como el producto de la casa Knauf. Sin embargo, el objetivo de este trabajo es la utilización de residuos plásticos en la propuesta de un producto respetuoso desde el punto de vista medioambiental.

Con la aplicación de la propuesta de techo suspendido continuo en la Escuela de Arquitectura de Granada, se consigue una mejora en la seguridad de sus ocupantes en caso de sismo, además de estar contribuyendo ecológicamente, al incluir en dicho sistema un material plástico contaminante, que genera toneladas de residuos a nivel mundial.

Las placas de yeso Knauf, con las que se ha realizado la comparativa, están reforzadas con fibra de vidrio, procedente de la materia prima de arena silíceo, cuya extracción al ser un recurso no renovable, presenta un gran impacto al contribuir con el calentamiento global, además de consumir grandes cantidades de energía debido a las altas temperaturas del proceso de fundido que alcanzan los 1450º, y un importante consumo de agua en su proceso de fabricación.

Aplicándolo al caso práctico de estudio, se ahorra 0,13 kg de fibra de vidrio por cada metro cuadrado de placas Knauf que dispusiéramos, o lo que es lo mismo, 0,312 kg de fibra por placa. Como se ha mencionado anteriormente, para una superficie de aplicación de 5235 m², que equivale a unas 2185 placas, se ahorrarían 680,8 kg de fibra de vidrio.

Otro aditivo que presentan las placas de yeso comerciales de Knauf es un componente químico aligerante que también sería sustituido por los hilos de polietileno tereftalato, puesto que por su formación aligeran las placas de yeso sin necesidad de dicho producto químico.

En la Escuela de Arquitectura de Granada, la aplicación de las placas de yeso propuestas supondría una reducción de aligerante a razón de 0,031kg por placa. Con el equivalente de unas 2185 placas, se ahorrarían 67,75 kg de aligerante en todo el edificio.

Por último, procedemos al cálculo de cuántos balones serían reciclados en este caso práctico. Teniendo en cuenta que cada placa propuesta necesita un total de 0,6kg de hilos de polietileno, que equivaldría a 7 balones y medio. Con las 2185 placas, se reutilizarían 16387,5 balones de manera ecoeficiente.



Figura 10. Interpretación del ACV de fabricación de lana de vidrio. Fuente: declaración ambiental de producto.

09. CONCLUSIONES.

Los residuos plásticos generados globalmente y su contaminación asociada se están extendiendo en los ecosistemas marinos y terrestres, teniendo consecuencias graves en el medio ambiente y en la salud humana. La contaminación por plásticos marinos y el cambio climático asociado contribuyen al calentamiento global y al aumento de la temperatura oceánica, repercutiendo en la biodiversidad de especies y en el ecosistema. Siendo la construcción uno de los sectores que más contribuye a este problema medioambiental.

El presente trabajo de investigación nace del interés de proporcionar materiales ecoeficientes procedentes de residuos plásticos para aplicarlos a un producto propuesto de construcción elaborado a partir de ellos y realizar la comparativa, tanto técnica como medioambiental, con productos similares en el mercado.

Tras la realización de ensayos mecánicos, se concluye que los hilos de polietileno tereftalato que componen la cara interior de balones deportivos, presentan un comportamiento óptimo para su uso como placa de yeso laminado aligerada con mejoras en el comportamiento frente a movimientos sísmicos.

En cuanto al producto resultante, se propone una placa de yeso laminado, para su aplicación en el ámbito de la construcción, en este caso como techo suspendido continuo, que presenta una serie de características positivas con respecto a placas comerciales:

- Puede considerarse producto ecoeficiente puesto que se compone de materias primas, el yeso, y materiales reciclados, hilos de polietileno tereftalato procedente de balones deportivos, a excepción del sistema de anclajes metálicos que sostiene el techo, por razones técnicas
- Su aplicación supone la reutilización de residuos plásticos que, acabarían en vertederos, degradando los ecosistemas del medioambiente.
- Reduce la extracción de yeso, su transporte y las emisiones que genera su proceso de fabricación.
- Sustituir la fibra de vidrio y aligerante que componen las placas de yeso del mercado, altamente contaminantes, por un sustituto de material reciclable, que aporta características similares a ambos.
- Evita la etapa de producción de la fibra de vidrio, disminuyendo el suministro de materias primas, transporte y fabricación, que contribuirán al calentamiento global, consumo de recursos no renovables y consumo de energía y agua.
- Mejora la característica de ductilidad del yeso, aportándole doble protección, los hilos de polietileno junto a los paneles de cartón que la recubren, ante caso de sismo

En definitiva, presenta una gran ventaja técnica y ambiental, iniciando una nueva línea de investigación futura, donde se exploren resultados más concluyentes sobre la introducción de hilos de polietileno en sector de la construcción.

10. BIBLIOGRAFÍA

10. BIBLIOGRAFÍA.

1. NORMA UNE-EN 13279-2. Yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.
2. Alameda, L., Calderón, V., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2015). Reciclado de Placas de Yeso laminado aligeradas con residuos de Poliuretano = recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales De Edificación*, 7(1), 33. doi:10.20868/ade.2015.3037
3. Alameda, L., Calderón, V., Junco, C., Rodríguez, A., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2016, October). Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. January 10, 2023, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.06015>
4. Azmi, N. B., Khalid, F. S., Irwan, J. M., Mazenan, P. N., Zahir, Z., & Shahidan, S. (2018). Performance of composite sand cement brick containing recycle concrete aggregate and waste polyethylene terephthalate with different mix design ratio. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140, 012129. doi :10.1088/1755-1315/140/1/012129
5. Foti, D. (2013). Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 96, 396-404. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.019
6. Ojeda, J. P., & Mercante, I. T. (2021). Reciclaje de Residuos Plásticos para la producción de agregados LIVIANOS. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*. doi:10.20937/rica.54081
7. Saikia, N., & Brito, J. D. (2013). Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. *Materials Research*, 16(2), 341-350. doi:10.1590/s1516-14392013005000017
8. Ecoembes. (2021, April 2). *Reciclar UN Balón de Baloncesto*. Ecoembes dudas del reciclaje. Retrieved March 23, 2023, from <https://ecoembesdudasreciclaje.es/te-enseamos-como-y-donde-reciclar-un-balon-de-baloncesto/>
9. [Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment - A review \(sciencedirectassets.com\)](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926641021000000)

10. Asadi Ardebili, A., Villoria Sáez, P., González Cortina, M., Tasán Cruz, D. M., Rodríguez Sáiz, Á., & Atanes-Sánchez, E. (2023). Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. *Construction and Building Materials*, 370, 130675. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130675
11. Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653-658. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055
12. Sobaler-Rodríguez, J., Villar-Burke, R., Sorribes-Gil, M., & Jiménez-González, D. (2022). Transmitancia Térmica de la envolvente y Cumplimiento del DB-he 2019 Para UN Bloque De Viviendas. *Informes de La Construcción*, 74 (565). doi:10.3989/ic.84149
13. UNE-EN ISO 12354-1:2018 (Versión corregida en fecha 2019-04-03). Acústica de edificios. Estimación del rendimiento acústico de los edificios a partir del rendimiento de los elementos. Parte 1: Aislamiento acústico a ruido aéreo entre recintos. (ISO 12354-1:2017). Normas UNE.AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación Aenor). <http://www.aenor.es/>
14. NORMA UNE-EN 13279-1. Yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.
15. Ruiz Frutos, A. (julio 2012). Análisis del ciclo de vida de materiales en construcción. *Estudio y comparación de los principales materiales de edificación*. Universidad Politécnica de Cartagena / Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación.
16. Dobrowolska, K. (04 de marzo de 2021). Archdesk. Obtenido de <https://archdesk.com/es/blog/como-afecta-la-construccion-almedio-ambiente/>
17. J. Moraño Rodríguez, A., Guillén Viñas, J.L., (2010) El enfibrado de los materiales de construcción. Trabajo ampliado. https://oa.upm.es/9253/2/INVE_MEM_2010_85548.pdf
18. Del Río Merino, M., Comino, P., Analysis of the strengthenings of mixed glass fibers E and fibers AR in plaster, as an alternative to monofiber (homogeneous) strengthenings. *Materiales de construcción* n° 261 vol. 51, págs.: 33-45. Edit: Instituto Eduardo Torroja. 2001
19. Alcaide, N.- "Yeso reforzado con fibra de vidrio y ífluidificante". Cátedra de materiales de construcción. ETSAM. 1992.

10. BIBLIOGRAFÍA

20. García Galindo, E., (2017). De Palacio a Escuela de Arquitectura. ETSA Granada. MUCRPA-Historia y Teoría de la intervención. https://oa.upm.es/47438/1/TFM_Garcia_Galindo_Ester.pdf
21. Declaración Ambiental de Producto (DAP) conforme a UNE-EN 15804:2012+A1:2014 e ISO 14025:2010. CLIMAVER A2 NETO. Alcance de la EPD®: España y Portugal. Versión: 2. N.º de registro EPD®: S-P-01248.

11. ANEXO.

Además del estudio mecánico expuesto en este trabajo de investigación, se realizaron otros ensayos junto con mis compañeros Marta Hernani Álvarez y Miguel Guerreo López-Palanco, como es el caso del ensayo térmico que se explica a continuación, así como otro ensayo mecánico realizado con globos de látex que por no dar resultados concluyentes decidimos obviar en esta investigación.

11.1. Ensayo térmico.

11.1.1. Introducción a la metodología y normativa de aplicación.

Para el estudio de la caracterización de la espuma de Poliuretano obtenida de la última capa de un balón se han evaluado al igual que el PET, que seguimos teniendo en cuenta en este ensayo, su composición y sus propiedades. Comprender las propiedades del Poliuretano es de gran ayuda para que cumpla correctamente su función en el ámbito constructivo. Se hace uso tanto del PET como del Poliuretano del balón aprovechando que este objeto está compuesto por diversas capas, con el fin de obtener el máximo provecho posible e incrementar la efectividad del proceso de reciclaje.

Para realizar el ensayo térmico se han elaborado una serie de probetas, distintas a las del ensayo mecánico, a partir de una mezcla de yeso y agua, volviendo a tener en cuenta la relación de 0,55 gramos de agua por cada gramo de yeso. En este proceso contamos con 3 fases, para poder comparar resultados: Una primera muestra compuesta únicamente por yeso y agua; una segunda muestra elaborada con yeso, agua, y PET; y por último, una tercera muestra hecha a partir de yeso, agua y Poliuretano. Sin embargo, en este ensayo ambos residuos del objeto de estudio tienen el mismo porcentaje de aditivo, un 4%. Estas muestras son de unas dimensiones menores y circulares, se han elaborado en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

En cuanto a la normativa de aplicación, hay una UNE-EN que se aplica a las muestras de probetas de yeso sometidas a un ensayo térmico, en este proceso se mide la conductividad térmica, la capacidad calorífica específica, la difusividad térmica y la densidad.

- **UNE-EN-12664:2001:** Productos prefabricado de yeso. Determinación de las propiedades térmicas.
- **UNE 92202:1989:** Materiales aislantes térmicos. Determinación de la conductividad térmica.
- **UNE-EN 12667:2002:** Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor.

11. ANEXO

11.1.2. Elaboración y dosificación de probetas.

Para el desarrollo de nuestra investigación en su fase experimental, realizaremos, en este caso, ensayos térmicos para analizar la resistencia de los materiales compuestos por yeso e hilos de urdimbre de polietileno tereftalato (PET), y por yeso y espuma de poliuretano. Estos dos residuos podrían mejorar la resistencia térmica del yeso debido a las propiedades aislantes que les corresponden, la espuma de poliuretano es un aislante térmico con una eficiencia notable, así como el PET cuenta con una conductividad térmica baja.

Con estas características partimos de la hipótesis de que dicho material podría mejorar las capacidades térmicas si se aplicase en productos utilizados en el sector de la construcción.

Para poder realizar este estudio de manera adecuada, optamos por elaborar una muestra con cada uno de los dos materiales escogidos, de manera que nos permitan comparar cómo varían las propiedades del producto final. Por este motivo, se realizarán tres muestras, con una probeta para cada una de ellas.

Estas tres muestras se definen como:

- Muestra 0: yeso sin aditivo.
- Muestra 1: yeso con aditivo de hilos de PET (4%).
- Muestra 2: yeso con aditivo de espuma de poliuretano (4%).

La ejecución de cada una de las muestras se realizará empleando un molde de tres probetas circulares, de 3 cm de radio y 2 cm de altura, que equivalen a 56,52 cm³, de acuerdo con la normativa UNE especificada en el anterior apartado 06.2.1. Como resultado final, obtendremos una probeta para el estudio térmico de yeso con aditivo de hilos de PET y una probeta para el yeso con aditivo de espuma de poliuretano.

La mezcla de materiales, en nuestro caso, consistirá por un lado en la adición de capas de hilos de PET a la mezcla de yeso, y por otro, la adición de la espuma de poliuretano a la mezcla de yeso. Ambos materiales los iremos añadiendo durante su amasado, obteniendo así una distribución homogénea y uniforme, y posteriormente vertiendo la mezcla en cada una de las probetas.

La cantidad de agua y yeso ha sido pesada y medida en básculas de precisión y jarras de medición que encontramos en el Laboratorio de Construcción, aportando también los moldes circulares para la muestra. En dicho laboratorio se dan unas condiciones ambientales no controladas, que varían entre los 20 y 25°C. Las mezclas, a su vez, han sido realizadas gracias a los instrumentos facilitados por el mismo departamento de Construcciones Arquitectónicas.

Entre los instrumentos utilizados para elaborar las muestras encontramos: báscula de precisión, pincel, jarra de medición, espátula de silicona, recipiente metálico, pala dosificadora y molde de metacrilato.

Para el ensayo, hemos utilizado balones de fútbol sin uso, de la marca Kipsta, pero en la realidad, todos los balones que hayan sido utilizados se consideran contaminados, por haber estado en contacto con residuos procedentes de todas las superficies con las que ha estado en contacto, por lo que se consideran no reciclables, además de que, al estar compuestos por varios materiales, pegados o cosidos entre sí, dificulta mucho más el proceso de reciclado. Por eso en este trabajo plantearemos la reutilización en el campo de la construcción, consiguiendo dar una nueva vida útil al producto.

Indagando sobre la composición del residuo utilizado, en este ensayo nos centramos tanto en la capa exterior de espuma de poliuretano, como en la capa interior de hilos de urdimbre de polietileno tereftalato (PET) [Imagen 14]. En ambos casos, debido a la geometría y características de los materiales, decidimos cortar en formas irregulares de dimensiones aproximadas de 0,5x1 cm para los hilos de urdimbre de PET, y de 0,3x0,6 cm, en el caso de la espuma de poliuretano. [Imagen 15].



Imagen 14. Hilos de polietileno de tereftalato procedente de la capa interior y espuma de poliuretano procedente de la capa exterior de un balón de fútbol. Fuente: elaboración propia.

El primer paso para la elaboración de las probetas fue tarar el recipiente utilizado para depositar el yeso y la jarra para medir el agua, y así posteriormente, poder pesar la cantidad exacta de yeso y agua que vamos a utilizar en la mezcla. El yeso facilitado por el laboratorio es del tipo B1/50/2.

La relación yeso-agua debe ser un 55% del peso del yeso. Calculamos 0,55 gramos de agua por cada gramo de yeso. Pero antes de realizar dicha la mezcla, debemos limpiar los moldes de las probetas y aplicarles una capa de desencofrante, para facilitar la posterior extracción de la probeta.

En cada uno de los moldes caben unos 66,23 gr de producto, por lo que las cantidades que resultan para cada una de las configuraciones es la siguiente:

- Muestra 0 yeso sin aditivo.

$$66,23 \text{ gr} \times 1 \text{ probeta} = 66,23 \text{ gr de yeso}$$

$$66,23 \text{ gr} \times 0,55 = 36,43 \text{ gr de agua}$$

- Muestra 1 adición del 4% de hilos de PET, que equivale a 2,65 gr de PET por cada una de las probetas.

$$66,23 \text{ gr} - 2,65 \text{ gr} = 63,58 \text{ gr de yeso}$$

$$63,58 \text{ gr} \times 0,55 = 34,97 \text{ gr de agua}$$

- Muestra 2 adición del 4% de espuma de poliuretano. 2,65 gr de PET por cada una de las probetas.

$$66,23 \text{ gr} - 2,65 \text{ gr} = 63,58 \text{ gr de yeso}$$

$$63,58 \text{ gr} \times 0,55 = 34,97 \text{ gr de agua}$$

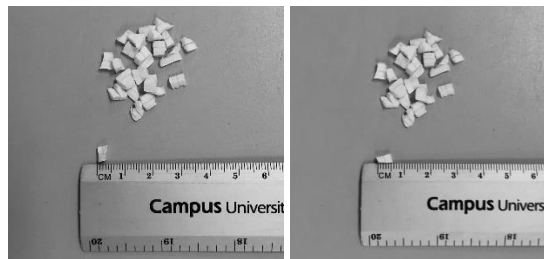


Imagen 15. Granulometría hilos de polietileno de tereftalato procedente de la capa interior de un balón de fútbol. Fuente: elaboración propia.



Imagen 16. Mezcla de yeso con hilos de PET. Fuente: elaboración propia.



Imagen 17. Vertido de la mezcla en las probetas de ensayo térmico. Fuente: elaboración propia.

Realizaremos la mezcla de los gramos de yeso y de los gramos de aditivo de hilos de PET o de espuma de poliuretano [Imagen 16], en cada caso, calculado anteriormente en cada una de las tres muestras en el recipiente metálico y a continuación iremos vertiendo con cuidado la cantidad de agua calculada, sin parar de mezclar, hasta que quede una masa homogénea, con las partículas de hilos de PET o de espuma de poliuretano, en su caso, distribuidas de la manera más uniforme posible. Posteriormente procedemos al vertido de la mezcla en cada uno de los moldes para cada aditivo, rellenándolos por completo. [Imagen 17]

Algo importante para tener en cuenta con el tipo de material elegido es que realmente el margen de error en el pesaje de yeso y de agua, hará que la densidad del material aditivo no sea significativa, ya que el añadido de aditivo corresponde en igual medida a la cantidad de yeso y agua del margen de error.

Obtenemos de esta manera un total de tres probetas. Una probeta de yeso sin aditivo, otra probeta con un 4% de aditivo de hilos de PET, y otra con un 4% de aditivo de espuma de poliuretano. [Imagen 18]



Imagen 18. Probetas realizadas Fuente: elaboración propia.

11.1.3. Metodología del ensayo.

El ensayo de comportamiento térmico de materiales de construcción está regulado por la normativa de aplicación UNE-EN 12667:2002, que establece los métodos de ensayo y procedimientos para obtener la resistencia térmica de materiales con baja conductividad térmica.

Una vez se han preparado las tres muestras, anteriormente mencionadas, y se han moldeado en la base cilíndrica de metacrilato se procede al secado, para así completar el tiempo de curación y evaporación del agua. Finalmente se llevan a una máquina de ensayo del tipo DTC 300. [Imagen 19]



Imagen 19. Máquina de ensayo térmico DTC 300. Fuente: elaboración propia.

Este instrumento trabaja como un medidor de flujo de calor encargado de recoger la medición de la conductividad térmica del material a estudiar, siempre que este cuente con una conductividad térmica baja o media, como sucede en este caso de estudio. La máquina cuenta con un sistema de calentamiento y enfriamiento que es controlado por una amplia variación de temperaturas. Al colocar las muestras en la cámara debemos programar una temperatura inicial y otra final y determinar la velocidad de calentamiento deseada. Al ejecutar el proceso y posteriormente analizar los datos, obtenemos los registros tanto de las temperaturas y como de sus flujos.

Para hallar la densidad aparente de las muestras, se conoce la dimensión de la muestra y el peso. Con estos datos, se hará la relación peso (gr) / volumen (cm^3), siendo el volumen el mismo en todos los casos, $56,52\text{cm}^3$. En el caso de este estudio se desconoce el peso final de la probeta, pero se prevén densidades inferiores a la probeta de referencia. Esto se debe a que el material añadido tiene una densidad inferior. Tras la inclusión de ambos materiales, debería verse reducida la densidad final de la probeta. Aunque estas pueden verse afectadas por factores como la compactación o la absorción del agua de los distintos materiales. La falta de agua durante el proceso de fraguado del yeso supondrá una reducción de su porosidad de la probeta. Esto entre otras cosas supone una reducción de su encapsulación de aire, reduciendo su densidad.

11. ANEXO

11.1.4. Análisis de los resultados.

Tras la realización de las pruebas se obtienen los siguientes resultados correspondientes a las tres probetas de nuestro caso de estudio:

PORCENTAJE aditivo	GROSOR cm	Tª MEDIA ºC	RESISTENCIA TÉRMICA m2K/W	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/mK
0%	1,4286	24,37	3,55E-02	0,403
4% PET	1,4946	24,19	3,64E-02	0,410
4% PU	1,5346	24,4	3,26E-02	0,471

Tabla 16. Resultados térmicos de las probetas realizadas Fuente: elaboración propia.

Se observan en los resultados anteriores como los valores de conductividad térmica aumentan en las probetas de yeso con aditivo de hilos de PET o de espuma de poliuretano con respecto a la probeta de yeso sin aditivo. Esta propiedad depende de la densidad del material y de la cantidad de aditivo empleado. Se consideran fuera del rango de los valores esperados, puesto que, aproximadamente la espuma de poliuretano tiene una conductividad térmica de 0,022 W/mK, según la Norma UNE 92202, siendo un material con una alta capacidad aislante y el tereftalato de polietileno (PET), en su caso, tiene una conductividad aproximada de 0,30 W/mK.

Por ello, vamos a considerar los resultados del ensayo como nulos, puesto que las probetas realizadas por nosotros fueron posteriormente manipuladas, pues no presentaban las medidas óptimas para la maquinaria de ensayo, y tuvieron que ser cortadas para así reducir su diámetro y espesor, por lo que sus condiciones iniciales pudieron verse alteradas. Lo que ha conducido a obtener unos resultados erróneos que no consideramos aptos para sacar una conclusión clara basada en los resultados dados.

Para apoyar nuestra conclusión, utilizamos la normativa UNE-EN ISO 6946:2012 basada en Componentes y elementos para la edificación. Resistencia y transmitancia térmicas. Método de cálculo. (ISO 6946:2007). De la que podemos sacar las siguientes conclusiones.

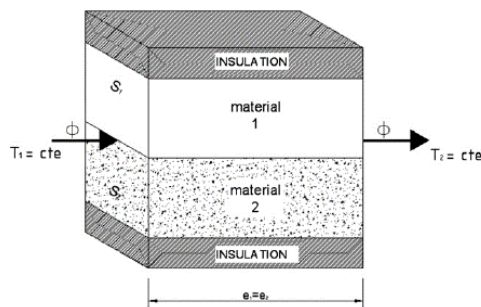
La resistencia térmica total de un producto se calcula mediante la suma de las resistencias térmicas de los distintos materiales que lo componen, siempre y cuando se encuentren dispuestos en serie:

$$R_{\text{total}} = R_A + R_B$$

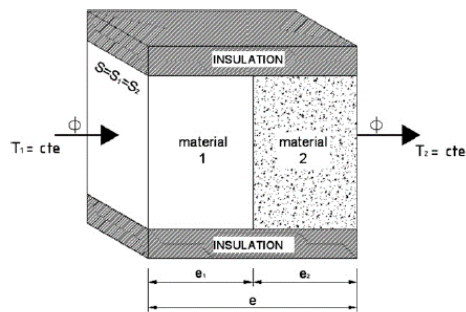
Mientras que, si dichos materiales se encuentran dispuestos en paralelo, la resistencia térmica sería la siguiente:

$$1/R_{\text{total}} = 1/R_A + 1/R_B$$

En cuanto a la obtención del valor de la transmitancia total del material, este dependerá de los valores de ambos materiales empleados, siendo el menor valor el obtenido de la disposición en serie y el mayor, y menos efectivo, su disposición en paralelo. Esto se ve reflejado en el estudio del departamento de construcción de la universidad de burgos en su investigación sobre neumáticos con mortero de cemento.



Gráfica 19. Comportamiento en paralelo. Fuente: estudio Universidad de Burgos.



Gráfica 20. Comportamiento en serie. Fuente: estudio Universidad de Burgos.

Table 6

Thermal conductivity of the experimental and theoretical composite considering performance both in series and in parallel.

Plaster board: $e = 2-3$ cm Polystyrene: $e = 2$ cm $\lambda = 0.037$			
Name	λ (W/m °C) parallel	λ (W/m °C) series	λ (W/m °C) experimental
R1	0.250	0.25	0.226
C-30-0.6	0.209	0.197	0.179
C-40-0.6	0.198	0.186	0.166
C-50-0.6	0.188	0.177	0.154
C-60-0.6	0.179	0.161	0.141
C-30-2.5	0.212	0.199	0.184
C-40-2.5	0.201	0.188	0.183
C-50-2.5	0.191	0.179	0.173
C-60-2.5	0.181	0.172	0.152
C-30-4.0	0.210	0.198	0.201
C-40-4.0	0.199	0.187	0.184
C-50-4.0	0.189	0.178	0.177

Tabla 16. Resultados de conductividad. Fuente: estudio Universidad de Burgos

En estos resultados se observa un aumento de las conductividades térmicas. Estos muestran la lógica de las fórmulas de transmitancia anteriormente expuestas en las que el valor en serie debe ser inferior que el paralelo.

La transmitancia térmica indica el calor que se intercambia por un material y este depende de los siguientes factores:

- Conductividad térmica (λ): cuanto mayor sea la conductividad térmica, mayor capacidad tiene el material para conducir calor, por lo que aumentará la transmitancia térmica.
- Espesor del material (d): un material más grueso proporciona una mayor resistencia térmica provocando una caída de la transmitancia térmica.
- Área de la superficie (m^2): cuanto mayor es el área que se expone al calor, mayor es la transmitancia térmica.

11. ANEXO

Además de estos valores antes mencionados, también será un factor para tener en cuenta el porcentaje de aditivo dentro de la probeta, que influirá en la conductividad térmica del producto final, así como también influirá el tamaño de las partículas de dicho aditivo. A mayor porcentaje y menor tamaño menor conductividad térmica. Este fenómeno se demuestra en el siguiente estudio referenciado sobre la influencia de la proporción y la granulometría del Poliuretano realizado por un equipo de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.

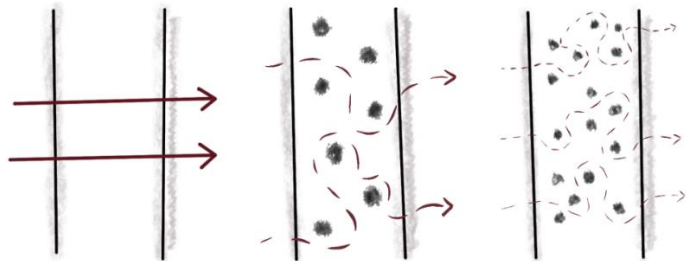
En la gráfica se representan las distintas granulometrías en paralelo con un tipo de representación distinta. Se observa como la línea que representa al número inferior de granulometría muestra valores de conductividad inferiores. Por esto, el estudio concluye que se observan mejoras de resistencia térmica en las probetas con una granulometría inferior y el mismo porcentaje de aditivo.

Esto se justifica con los flujos de calor de las distintas probetas. Al añadir este aditivo, el espesor eficaz es mayor. Esto incrementa el recorrido térmico y disminuye la Resistencia térmica de la probeta. Con la siguiente fórmula se demuestra la ventaja del aumento de la longitud del recorrido para obtener una menor transmitancia térmica, en este cálculo influye también la resistencia térmica del material:

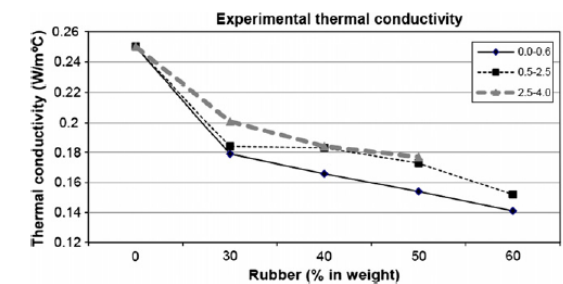
$$U = l/(R \times S)$$

- U: Transmitancia térmica (en $W/(m \cdot K)$)
- R: Resistencia térmica (en $m \cdot K/W$)
- L: Longitud del recorrido (en metros)

En el siguiente esquema de elaboración propia resumimos el estudio anterior:



Gráfica 22. Comportamiento del flujo de calor según la cantidad de aditivo en la muestra. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 21. Comportamiento del flujo de calor según la cantidad de aditivo en la muestra.

El análisis de esta fase se ha apoyado también sobre un estudio de referencia mencionado en el punto 02.5 de la Universidad de Burgos, en el cual se hace un análisis experimental con distintas proporciones de poliamida para obtener un yeso más aligerado que mejore las propiedades térmicas del producto posteriormente empleado en la construcción. En este experimento se lleva a cabo un ensayo de conductividad térmica mediante el método de la placa caliente protegida y del caudalímetro de calor que establece una uniformidad en la relación entre la densidad del flujo de calor.

Por otro lado, como alternativa, en este mismo estudio muestra que la porosidad general de la probeta acaba disminuyendo a mayor volumen de residuo. Se debe a dos factores: la distribución homogénea del residuo con el yeso previamente al fraguado que produce un relleno parcial de los huecos y el otro condicionante es que la sustitución del yeso por el residuo supone una menor cantidad de agua en la muestra a la vez que el residuo. Esto puede como consecuencia afectar al rendimiento térmico general de la probeta al reducir la porosidad del yeso por la falta de agua durante su fraguado. La porosidad es inversamente proporcional a su conductividad térmica, y una reducción general, como es el caso, puede afectar a sus resultados. Y se ve afectada con el aumento del aditivo como muestra otra serie de resultados del estudio referenciado anteriormente.

Cuadro 1
Muestras de yeso, relación de volumen, relación agua/conglomerado, densidad y porosidad.

Serie no.	Muestra	Relación de volumen (PAW/yeso)	w/(p + PAW)	Tiempo de fraguado (min)	Densidad a los 7 días-muestras secas (kg/m ³)	Porosidad (%)
Referencia	G0	0/1	0.40	10.3	1477	37.38
Serie I	G0.5PA	0.5/1	0.43	16.0	1190	35.64
	G1PA	1/1	0.42	18.0	1074	35.00
	G2PA	2/1	0.45	21.0	909	35.27
	G3PA	3/1	0.48	26.0	829	33.44
	G4PA	4/1	0.50	30.0	751	29.20

Tabla 17. Resultados del estudio de la porosidad. Fuente: estudio Universidad de Burgos.

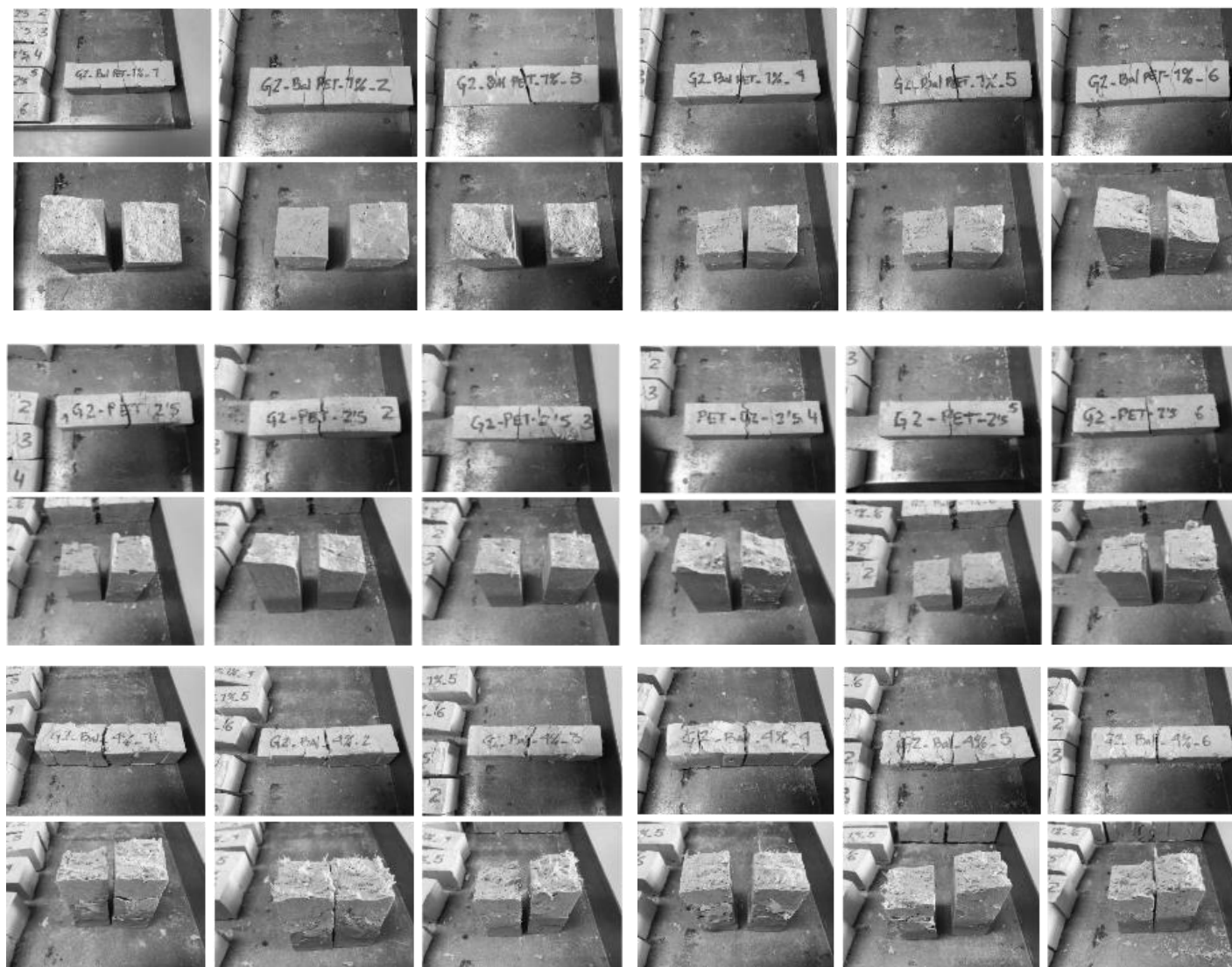
11. ANEXO

11.2. Resultados ensayos.

11.2.1. Cálculos ensayo mecánico

PORCENTAJE PET	PESO 03/03	PESO 06/03	PESO 07/03	DENSIDAD	FLEXIÓN		COMPRESIÓN A		COMPRESIÓN B		COMPRESIÓN MEDIA
	gr	gr	gr	gr/cm ³	Kgf	MPa	Kgf	MPa	Kgf	MPa	MPa
0%	326,30	318,51	318,10	1,243	0,188	4,406	2,066	12,913	1,974	12,338	12,625
0%	329,18	318,57	318,06	1,242	0,190	4,453	2,140	13,375	2,046	12,788	13,081
0%	330,29	321,55	321,13	1,254	0,184	4,313	1,975	12,344	2,163	13,519	12,931
0%	343,88	325,16	324,73	1,268	0,195	4,570	2,152	13,450	1,954	12,213	12,831
0%	350,28	329,35	328,91	1,285	0,216	5,063	2,064	12,900	2,131	13,319	13,109
0%	356,02	328,27	327,86	1,281	0,216	5,063	1,932	12,075	1,959	12,244	12,159
1%	322,81	320,68	320,38	1,251	0,197	4,617	1,568	9,800	1,151	7,194	8,497
1%	321,21	312,78	317,50	1,240	0,174	4,078	1,468	9,175	1,310	8,188	8,681
1%	320,40	312,47	312,22	1,220	0,146	3,422	1,308	8,175	1,537	9,606	8,891
1%	322,05	313,59	313,36	1,224	0,157	3,680	1,399	8,744	1,540	9,625	9,184
1%	332,40	323,54	323,25	1,263	0,179	4,195	1,386	8,663	1,628	10,175	9,419
1%	321,05	317,42	317,18	1,239	0,176	4,125	1,486	9,288	1,307	8,169	8,728
2,50%	356,33	309,34	308,67	1,206	0,162	3,797	1,443	9,019	1,215	7,594	8,306
2,50%	363,09	313,27	311,82	1,218	0,163	3,820	1,243	7,769	1,351	8,444	8,106
2,50%	364,17	317,51	315,49	1,232	0,142	3,328	1,368	8,550	1,172	7,325	7,938
2,50%	362,92	315,93	311,40	1,216	0,143	3,352	1,045	6,531	1,306	8,163	7,347
2,50%	358,89	318,96	313,13	1,223	0,153	3,586	1,433	8,956	1,430	8,938	8,947
2,50%	358,27	319,84	313,95	1,226	0,166	3,891	1,259	7,869	1,371	8,569	8,219
4%	352,82	320,30	312,53	1,221	0,146	3,422	1,059	6,619	1,068	6,675	6,647
4%	347,22	319,57	314,71	1,229	0,166	3,891	1,096	6,850	1,078	6,738	6,794
4%	332,75	316,75	315,83	1,234	0,181	4,242	1,091	6,819	1,022	6,388	6,603
4%	316,18	308,03	307,65	1,202	0,159	3,727	1,022	6,388	1,112	6,950	6,669
4%	326,16	318,14	317,81	1,241	0,140	3,281	1,127	7,044	1,160	7,250	7,147
4%	325,73	317,30	316,91	1,238	0,130	3,047	1,080	6,750	1,137	7,106	6,928

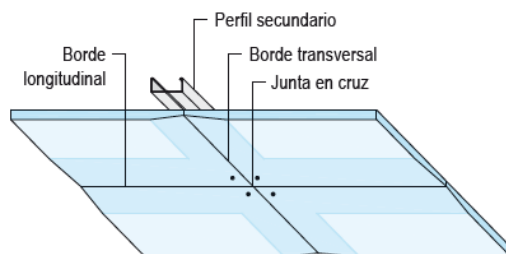
11.2.2. Fotografías rotura de probetas ensayo mecánico



11. ANEXO

11.2.3. Cálculos ensayo térmico

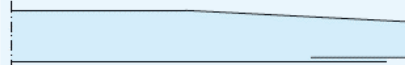
PORCENTAJE aditivo	GROSOR cm	T^a MEDIA °C	RESISTENCIA TÉRMICA m ² K/W	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA W/mK
0%	1,4286	24,37	3,55E-02	0,403
4% PET	1,4946	24,19	3,64E-02	0,410
4% PU	1,5346	24,4	3,26E-02	0,471



K724L.es Knauf Lightboard Horizon

Placa ligera con 4 bordes afinados para techos suspendidos con acabado prémium

Datos técnicos

Descripción	Unidad	Valor	Norma
Tipo de placa	-	A Operaciones a) y b)	UNE-EN 520 UNE-EN 14190
Reacción al fuego UNE-EN 13501-1	Clase	A2-s1,d0 (C.2)	UNE-EN 14190
Tipo de borde	-	Cuatro bordes afinados (4BA) 	-
Tolerancia de anchura	mm	+0 / -4	UNE-EN 520
Tolerancia de longitud	mm	+0 / -5	UNE-EN 520
Tolerancia de espesor	mm/m	+0,5 / -0,5	UNE-EN 520
Tolerancia de ortogonalidad	mm/m	≤ 2,5	UNE-EN 520
Factor de resistencia al vapor de agua μ :			
Seco	-	10	UNE-EN ISO 10456
Húmedo	-	4	
Conductividad térmica λ	W/(m·K)	≤ 0,21	UNE-EN ISO 10456
Densidad	kg/m ³	≥ 520	-
Peso (nominal)	kg/m ²	aprox. 6,5	-
Carga de rotura a flexión			
longitudinal:	N	≥ 550	UNE-EN 520
transversal:		≥ 210	

Medidas y embalaje

Descripción	Anchura mm	Longitud mm	Espesor mm	Unidad de embalaje	Código
Lightboard Horizon 4BA	1200	2000	12,5	50 unidades/palé 120 m ² /palé	679928
	1200	2500	12,5	50 unidades/palé 150 m ² /palé	679947

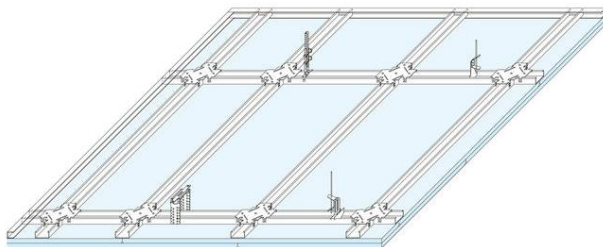
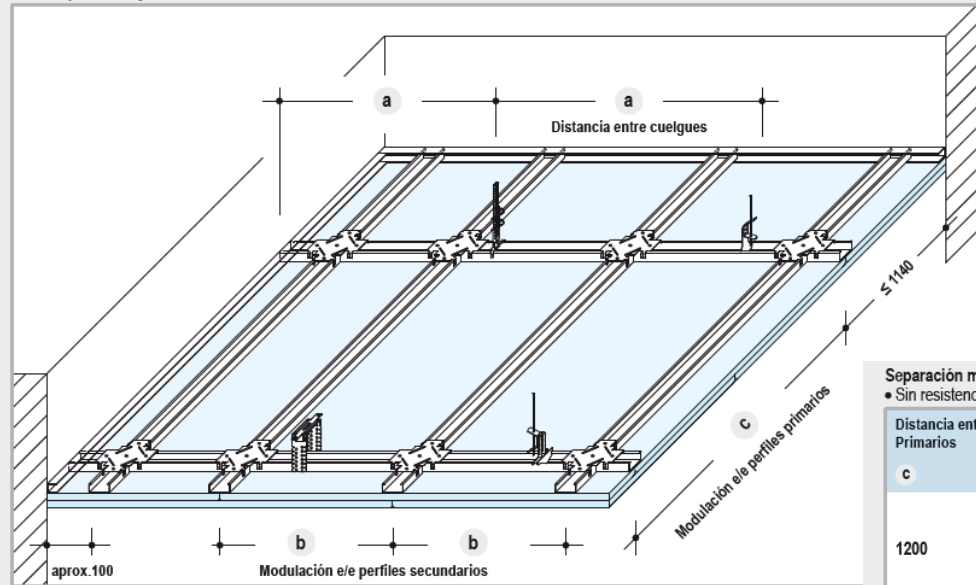
11.3.2. Sistema de techo suspendido continuo D113

D113.es Knauf Techos Suspendidos

Con maestra CD 60/27 y estructura metálica al mismo nivel



Perfiles primarios y secundarios al mismo nivel



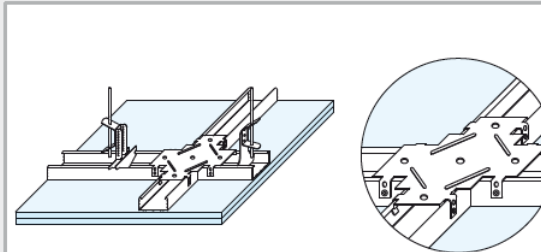
Separación máxima de la estructura

• Sin resistencia al fuego

Distancia entre Primarios c	Distancia entre Cuelgues a Rango kN/m ² (Ver página 2)		
	≤ 0,15	≤ 0,30	≤ 0,50 ¹⁾
1100	-	-	-
1200	-	650	-
-	-	-	650

1) Utilizar cuelgues con capacidad de carga de 0,40 kN

Sistema D113.es con resistencia al fuego



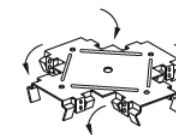
Ver modulaciones y espesores de placa en página 13

Se deben doblar y atornillar las lengüetas del emplame en cruz al perfil 60/27 con tornillos LN 3,5 x 9 mm.

La longitud de los perfiles secundarios es de 114 cm.

Unión entre primarios y secundarios

Empalme en cruz



Para sistemas sin resistencia al fuego, doblar las lengüetas sobre la maestra CD 60/27 para unir los perfiles primarios y secundarios.

Separación máxima entre secundarios

• Sin resistencia al fuego

Esesor placa mm	Placa Transversal a los secundarios mm	b
12,5 / 2x12,5	500	En caso de protección al fuego, ver otras soluciones en página 13
15	550	
18	600	

