

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACION



**ESTUDIO Y VIABILIDAD DEL RECICLAJE DE MATERIAL
PROCEDENTE DE PELOTAS DE PÁDEL/TENIS PARA SU
EMPLEO EN PRODUCTOS A BASE DE YESO**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

MARTA RODRIGUEZ AYBAR

Ingeniera de la Edificación

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Edificación

Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación

**Estudio y viabilidad del reciclaje de
material procedente de pelotas de
pádel/tenis para su empleo en productos
a base de yeso**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Marta Rodríguez Aybar

Ingeniera de la Edificación

Bajo la dirección de:

Dr. Cesar Porras Amores

Dra. María Esther Moreno Fernández

Madrid, 2024

Título: Estudio y viabilidad del reciclaje de material procedente de pelotas de pádel/ tenis para su empleo en productos a base de yeso.

Autor: Marta Rodríguez Aybar.

Programa de Doctorado: Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación.

Dirección de tesis:

Dr. Cesar Porras Amores, Doctor por la UPM. (director).

Profesor titular de universidad. Universidad Politécnica de Madrid.

Dra. M.^a Esther Moreno Fernández, Doctora por la UC3M.

Profesora titular interina de escuela universitaria.

Universidad Politécnica de Madrid.

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado, un esfuerzo total es una victoria completa”.

Mahama Gandhi

Agradecimientos

Desde Taiwán (punto de origen de parte de los residuos) a Madrid (punto de origen de la tesis), han sido muchas las personas que, de manera directa o indirecta, han colaborado con sus medios, tiempo, apoyo, paciencia y de una manera desinteresada en construir esta tesis. A todas ellas les quiero dar las GRACIAS, porque si no todo esto no hubiera sido posible. En especial:

A mi padre gracias por estar siempre dispuesto a echar una mano en todo nuevo proyecto. ¡Por algo somos un equipo!

A Cesar Porras como director de tesis, por su incansable paciencia, su ánimo constante, su trabajo pulcro. Gracias por regalarme tu tiempo sin pedir nada a cambio.

A Esther Moreno por aceptar ser mi codirectora de tesis desde el primer momento aun sabiendo que esto era un camino duro, gracias por facilitármelo.

A Álvaro Pérez por ayudarme a entender la estadística y evitar que perdiera el tiempo sin necesidad. Gracias por mostrarme lo valiosos que son los números cuando se entienden.

A la Escuela Técnica Superior de Industriales y de Arquitectura de Madrid, así como a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla por permitirme realizar parte de los ensayos.

A la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid y a su personal de laboratorio Javier Acirón y Santiago Villa gracias por vuestra ayuda y sobre todo compañía en la realización de los ensayos, habéis hecho que me sienta como en casa.

A Alejandro Pedreño que, sin conocernos apenas, creyó en mí, en mi trabajo y no dudó en ser uno más. Gracias por tú complicidad.

A Mariano González por tus años de enseñanza, tu apoyo, tu experiencia, tus consejos. Gracias por ser parte de este proyecto.

A mis compañeros padeleros, gracias por vuestras pelotas. Sin ellas esto no hubiera continuado.

Por último, gracias a mi marido, hijos y hermanos por su apoyo incondicional, por su cariño y por levantarme en los momentos más complicados. ¡Que afortunada soy de teneros cerca!

Gracias, gracias, gracias.

ABSTRACT

According to data from the Industrial Construction Observatory, in 2023 the building sector accounted for 10.4% of the GDP in Spain, employing more than 1.3 million people [1]. On the other hand, currently, around 300 million padel/tennis balls are consumed in the world per year [2], made with vulcanized natural rubber and covered with felt (polyamide), which generate around 20.000 tons of low-degradability waste that is difficult to eliminate, whose destination is usually landfill incineration. Natural rubber cannot be transformed, and its degradation is very slow. Polyamide is not biodegradable, and the recycling process is complex and would involve a prior separation phase of both materials. Therefore, it is essential to reuse waste materials from balls as much as possible once they have been discarded for sports use. One option would be to mix them with other materials through an exclusively mechanical process and thus obtain a product that can be used for another purpose.

This research aims to contribute to reducing the environmental impact associated with waste from paddle/tennis balls. To this end, it is proposed to incorporate these wastes into gypsum matrices, reducing the amount of raw material used and thus improving the sustainability of the material. A significant impact is to be expected considering that gypsum is one of the main binders used in the construction field.

A composite material has been manufactured by mixing the crushed ball waste with the gypsum binder and the viability of this new product for its use in construction has been studied. The physical and mechanical properties of the gypsum mixtures with different proportions of crushed balls waste and with different water/gypsum ratios have been determined to decide the optimal dosage that provides the best properties. Tests are carried out to determine the apparent density, thermal conductivity, mechanical resistance (flexion and compression), scanning microscopy (SEM), X-ray diffraction, fire resistance, and a statistical analysis has been carried out on the influence of the variables on the properties of the plaster/waste composite material. In parallel, computational models have been developed for the analysis of mechanical behavior (SAP2000[®]) and annual energy behavior (Design Builder[®]) in a theoretical 4-story building. Finally, the environmental impact of the

manufacturing of the composite material has been evaluated using the Life Cycle Analysis tool.

An innovative gypsum-based material has been achieved with excellent properties, for application in construction and that, in addition, minimizes the amount of vulcanized natural rubber and felt waste with which padel tennis balls are manufactured.

The addition of the particles to the gypsum matrix decreases the flexural strength by around 40%, when the residue is only rubber or rubber + felt; but complying in any case with the minimum required by the standard, behavior that also corresponds to the compression resistance. With the felt residue added to the plaster, a material with a density of 0.72 g/cm³ is achieved, lighter than its reference without residue. On the other hand, thermal conductivity improves by 32% with larger amounts of waste and higher w/y ratios. The tested specimens have good fire resistance, being non-combustible and not presenting cracks or decomposition at high temperatures. Its behavior would be like plaster coatings that are currently universally used.

The environmental behavior of the product evaluated applying the LCA tool has shown that in the samples with 25% rubber waste + felt it represents a reduction in CO₂ emissions and energy consumption.

RESUMEN

Según datos del Observatorio Industrial de la Construcción, en 2023 el sector de la edificación supuso un 10,4% del PIB en España empleando a más de 1,3 millones de personas [1]. Por otro lado, actualmente, en el mundo se consumen unos 300 millones de pelotas de pádel/tenis al año[2], fabricadas con caucho natural vulcanizado y revestidas de fieltro (poliamida) que generan alrededor de 20.000 toneladas de residuos de baja degradabilidad y de difícil eliminación, cuyo destino final suele ser la incineración en vertedero. El caucho natural no se puede transformar y su degradación es muy lenta. La poliamida no es biodegradable y el proceso de reciclaje es complejo e implicaría una fase previa de separación de ambos materiales. Por lo tanto, es esencial reutilizar al máximo posible los materiales de desecho procedentes de las pelotas, una vez que estas han sido descartadas para su uso deportivo. Una opción sería mezclarlos con otros materiales mediante un proceso exclusivamente mecánico y obtener así un producto que se pueda emplear para otro fin.

Esta investigación pretende contribuir a reducir el impacto ambiental asociado a los residuos procedentes de pelotas de pádel/tenis. Para ello, se propone incorporar estos residuos en matrices de yeso reduciendo la cantidad de materia prima utilizada y mejorando así la sostenibilidad del material. Es de esperar un impacto significativo teniendo en cuenta que el yeso es uno de los principales conglomerantes utilizados en el ámbito de la construcción.

Se ha fabricado un material compuesto mezclando los residuos de pelotas trituradas con el conglomerante yeso y se ha estudiado la viabilidad de este nuevo producto para su empleo en construcción. Se han determinado las propiedades físico-mecánicas de mezclas de yeso con diferentes proporciones de residuos triturados procedentes de las pelotas y con diferentes relaciones agua/yeso para determinar la dosificación óptima que aporte las mejores propiedades. Se realizan ensayos para determinar la densidad aparente, conductividad térmica, resistencias mecánicas (flexión y compresión), microscopía de barrido (SEM), difracción de rayos X, resistencia al fuego y se ha realizado un análisis estadístico sobre la influencia de las variables en las propiedades del material compuesto yeso/residuos. En paralelo, se han desarrollado modelos computacionales para el análisis del comportamiento mecánico (SAP2000[®]) y el energético anual (Design Builder[®]) en un edificio teórico de 4

plantas. Por último, se ha evaluado el impacto medioambiental de la fabricación del material compuesto empleando la herramienta Análisis de Ciclo de Vida.

Se ha conseguido un material innovador a base de yeso con excelentes propiedades, de aplicación en construcción y que, además, minimiza la cantidad de residuos de caucho natural vulcanizado y fieltro con los que se fabrican las pelotas de pádel tenis.

Las adiciones de las partículas en la matriz de yeso disminuyen entorno a un 40% la resistencia a flexión, cuando el residuo es sólo caucho o caucho + fieltro; pero cumpliendo en cualquier caso los mínimos exigidos por la norma, comportamiento que también se corresponde con la resistencia a compresión. Con el residuo de fieltro añadido al yeso, se consigue un material con densidad $0,72 \text{ g/cm}^3$, más ligero que los de su referencia sin residuo. Por otro lado, la conductividad térmica mejora en un 32% con cantidades mayores de residuo y mayores relaciones w/y. Las probetas ensayadas presentan buena resistencia al fuego, siendo ignífugas y resistentes a altas temperaturas. Su comportamiento sería similar a los revestimientos de yeso/escayola que son utilizados en la actualidad.

El comportamiento medioambiental del producto evaluado aplicando la herramienta ACV ha puesto de manifiesto que en las muestras con un 25% de residuo de caucho + fieltro supone una disminución de emisiones de CO_2 y del consumo energético.

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>	- 5 -
<i>Figura 2. Informe sobre el desfase en las emisiones PNUMA (2017-2021) [14]</i>	- 9 -
<i>Figura 3. Economía circular en la edificación.</i>	- 13 -
<i>Figura 4. Percepción de los ciudadanos: Sobre economía circular.</i>	- 14 -
<i>Figura 5. Comportamiento del sector de la construcción, 2022.</i>	- 15 -
<i>Figura 6. Aportación al PIB en España 2005-2021</i>	- 16 -
<i>Figura 7. Clasificación de los materiales. Fuente: Propia</i>	- 20 -
<i>Figura 8. Ejemplos materiales Orgánicos (Corcho, paja, madera, bambú).</i>	- 21 -
<i>Figura 9. Materiales Pétreos: Granito, mármol, pizarra y grava</i>	- 22 -
<i>Figura 10. Materiales metálicos: Aluminio, cobre, hierro.</i>	- 22 -
<i>Figura 11. Materiales cerámicos.</i>	- 23 -
<i>Figura 12. Aglomerantes (arcilla, alquitrán), Conglomerantes (yeso, cal, cemento)</i>	- 24 -
<i>Figura 13. Materiales metálicos (aluminio, zinc, cobre...)</i>	- 25 -
<i>Figura 14. Aplicaciones vidrio.</i>	- 26 -
<i>Figura 15. Materiales poliméricos (Poliamidas, PVC, Pinturas...).</i>	- 27 -
<i>Figura 16. Materiales compuestos.</i>	- 28 -
<i>Figura 17. Evolución anual de producción del yeso en España de 2011 a 2021</i>	- 31 -
<i>Figura 18. Clasificación de los plásticos.</i>	- 42 -
<i>Figura 19. 1ª (A) y 2ª fase (B) de fabricación de las pelotas de pádel</i>	- 45 -
<i>Figura 20. A) 3ª y B) 4ª fase de fabricación de las pelotas de pádel</i>	- 46 -
<i>Figura 21. 5ª fase de fabricación (A) de las pelotas de pádel (B).</i>	- 46 -
<i>Figura 22. Residuos producidos en la fabricación de las pelotas de P/T.</i>	- 47 -
<i>Figura 23. Consumo de caucho natural y sintético a nivel mundial (1990-2022).</i>	- 51 -
<i>Figura 24. Licencias federativas del pádel y tenis.</i>	- 55 -
<i>Figura 25. Fases de la investigación.</i>	- 81 -
<i>Figura 26. Escayola Iberyola – Placo</i>	- 83 -
<i>Figura 27. a) Residuo de fieltro; b) Residuos de caucho; c) Fieltro + caucho triturado de residuos de pelotas</i>	- 85 -
<i>Figura 28. a) Máquina trituradora, b y c) Trituración residuo industrial, d) Trituración residuo producto</i>	- 85 -
<i>Figura 29. a) Columna de tamizado. b) Separación del residuo por tamaños</i>	- 86 -
<i>Figura 30. Clasificación de los residuos tamizados</i>	- 87 -
<i>Figura 31. Equipo de Difracción Rayos X</i>	- 87 -
<i>Figura 32. Izquierda: equipo SEM-FEI TENEO para la realización de las muestras. Derecha: muestras metalizadas para su análisis.</i>	- 88 -

<i>Figura 33. Proceso de confección de probetas</i>	- 90 -
<i>Figura 34. Tipos de probetas para realización de ensayos</i>	- 92 -
<i>Figura 35. Mesa de sacudidas</i>	- 95 -
<i>Figura 36. Medición de la consistencia de la pasta</i>	- 96 -
<i>Figura 37. Determinación de la dureza superficial SHORE C</i>	- 97 -
<i>Figura 38. Ensayo de la resistencia a flexión</i>	- 98 -
<i>Figura 39. Ensayo de resistencia a compresión: a) Equipo Autotest de Iberest, b) Probetas sometidas al ensayo de compresión</i>	- 99 -
<i>Figura 40. Muestras para el ensayo de Absorción de Agua</i>	- 100 -
<i>Figura 41. Muestra sumergida en agua</i>	- 101 -
<i>Figura 42. Determinación de la absorción de agua por capilaridad</i>	- 101 -
<i>Figura 43. Probetas en cámara húmeda</i>	- 102 -
<i>Figura 44. Fases de un fuego natural y fases de un fuego estandarizado [127]</i>	- 103 -
<i>Figura 45. Izquierda: preparación ensayo; Derecha: Posición de las probetas</i>	- 104 -
<i>Figura 46. Proceso ensayo a fuego a) Ignición, b) Calentamiento, c) Fuego latente</i>	- 104 -
<i>Figura 47. Equipo de medición de conductividad térmica. (HFM 436)</i>	- 105 -
<i>Figura 48. Esquema de funcionamiento equipo HFM</i>	- 105 -
<i>Figura 49. Definición de material YESO y elementos PANEL</i>	- 109 -
<i>Figura 50. Definición de vínculos y cargas sobre las placas</i>	- 110 -
<i>Figura 51. Molde para la ejecución de placas de techo en laboratorio</i>	- 111 -
<i>Figura 52. Ensayo de rotura a flexión de la placa en laboratorio</i>	- 112 -
<i>Figura 53. Ensayo de resistencia al choque-impacto: a) Material de ensayo, b) Medición de profundidad huella y c) Impacto en muestra de referencia</i>	- 113 -
<i>Figura 54. Edificio de referencia y distribución de las viviendas</i>	- 117 -
<i>Figura 55. Curvas granulométricas de los residuos</i>	- 127 -
<i>Figura 56. Difractograma de Rayos X de la escayola</i>	- 127 -
<i>Figura 57. Microscopía de los residuos a 100x: a) caucho, b) fieltro, c) caucho +fieltro</i> .-	- 128 -
<i>Figura 58. Determinación de la densidad con diferentes relaciones w/y, tipo de residuo y % de adición</i>	- 130 -
<i>Figura 59. Dureza SHORE C de los compuestos</i>	- 131 -
<i>Figura 60. Resistencias medias a flexión UNE-EN 13279</i>	- 133 -
<i>Figura 61. Resistencias medias a Compresión UNE-EN 13279</i>	- 134 -
<i>Figura 62. Microscopía de: a) yeso b) yeso-caucho 0,5-C-M, yeso- fibra 0,5-F-M, (d) yeso-caucho + fibra 0,5-CF-M</i>	- 135 -
<i>Figura 63. Reconstrucción 3D y sección transversal del compuesto 0,5-CF-M evaluado mediante XCT</i>	- 136 -
<i>Figura 64. Resultados de Resistencia a compresión (ANOVA)</i>	- 136 -

<i>Figura 65. Resultados de Resistencia a flexión (ANOVA)</i>	- 137 -
<i>Figura 66. Capacidad de retención de agua</i>	- 140 -
<i>Figura 67. Resultados de Ensayo de absorción total de agua</i>	- 141 -
<i>Figura 68. Dureza Shore C antes y después del ensayo cámara húmeda.</i>	- 143 -
<i>Figura 69. Resistencia a flexión antes y después del ensayo cámara húmeda.</i>	- 144 -
<i>Figura 70. Resistencia a compresión antes y después del ensayo cámara húmeda.</i> ...	- 145 -
<i>Figura 71. Temperaturas alcanzadas por los distintos compuestos y disposiciones</i>	- 147 -
<i>Figura 72. Estado de las probetas después del ensayo a fuego directo.</i>	- 148 -
<i>Figura 73. Temperaturas alcanzadas por las probetas exteriores.</i>	- 149 -
<i>Figura 74. Temperaturas alcanzadas por las probetas en posición intermedia</i>	- 150 -
<i>Figura 75. Temperaturas alcanzadas por las probetas en posición interior.</i>	- 150 -
<i>Figura 76. Resultados del comportamiento térmico.</i>	- 151 -
<i>Figura 77. Comparación tensión máxima admisible a tracción y tensión máxima a tracción en ensayos.</i>	- 157 -
<i>Figura 78. Pérdidas-ganancias energéticas por transmisión según la superficie a lo largo del año en Sevilla.</i>	- 162 -
<i>Figura 79. Pérdidas- ganancias energéticas por transmisión según la superficie a lo largo del año en Soria.</i>	- 162 -
<i>Figura 80. Límites del sistema ACV.</i>	- 166 -
<i>Figura 81. Resultados de las emisiones de GWP para cada placa</i>	- 169 -
<i>Figura 82. Resultados de los consumos de EE para cada placa.</i>	- 169 -
<i>Figura 83. Gráficos de diagnóstico para el modelo ANOVA de tres vías para la resistencia a la flexión en función del agua/yeso, el tipo de residuo y la cantidad de residuo. Residuos contra valores ajustados (izquierda). QQ gráfico de los residuos (derecha).</i>	- 248 -
<i>Figura 84. Gráficos de diagnóstico del modelo ANOVA para la resistencia a la compresión en función del w/y, el tipo de residuo y la cantidad de residuo. Residuos contra valores ajustados (izquierda). QQ gráfico de los residuos (derecha)</i>	- 249 -
<i>Figura 85. Izquierda: resistencia a la compresión en función de la resistencia a la flexión (arriba) y ambas propiedades mecánicas en función de la dureza de la superficie. Derecha: resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y dureza superficial, dependiendo de la densidad de cada muestra.</i>	- 250 -
<i>Figura 86. Densidad de las probetas en función de la relación agua/yeso, del tipo de residuo y de la cantidad de residuo.</i>	- 252 -

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Transformaciones del yeso con la temperatura</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Tabla 2. Tipos de conglomerante de yeso según la norma UNE-EN 13279-1</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Tabla 3. Características de las pelotas de pádel y tenis.</i>	<i>- 44 -</i>
<i>Tabla 4. Países productores del caucho</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Tabla 5. Propiedades del caucho.....</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Tabla 6. Ensayos para caracterización de materias primas. compuestos y placas.</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Tabla 7. Resumen de muestras según relación agua/yeso, tipo y cantidad de residuo. -</i>	<i>92 -</i>
<i>Tabla 8. Resumen de muestras según relación w/y, tipo y cantidad de residuo. 2ª F. ...</i>	<i>- 93 -</i>
<i>Tabla 9. Designación de los compuestos según tipo y cantidad de residuo.</i>	<i>- 93 -</i>
<i>Tabla 10. Características de sistema constructivo de cerramiento de fachada.....</i>	<i>- 118 -</i>
<i>Tabla 11. Características de sistema constructivo de cubierta plana transitable.</i>	<i>- 118 -</i>
<i>Tabla 12. Análisis granulométrico de los residuos.....</i>	<i>- 126 -</i>
<i>Tabla 13. Resultado de la mesa de sacudidas UNE EN 13279-2.....</i>	<i>- 129 -</i>
<i>Tabla 14. Resistencias medias a flexión y compresión UNE-EN 13279.</i>	<i>- 132 -</i>
<i>Tabla 15. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de la resistencia a la flexión y a la compresión.</i>	<i>- 137 -</i>
<i>Tabla 16. Relación de pesos húmedos y secos.</i>	<i>- 139 -</i>
<i>Tabla 17. Resultados ensayo de capilaridad.....</i>	<i>- 142 -</i>
<i>Tabla 18. Retención de agua, antes y después del ensayo cámara húmeda.</i>	<i>- 143 -</i>
<i>Tabla 19. Resultado ensayo fuego directo</i>	<i>- 146 -</i>
<i>Tabla 20. Ejem. de tabla desarrollada para evaluación mecánica de la placa R. 0,6.-</i>	<i>156 -</i>
<i>Tabla 21. Ensayo de resistencia al impacto de las placas.....</i>	<i>- 158 -</i>
<i>Tabla 22. Consumo energético por transferencia de calor de las renovaciones de aire y a través de la envolvente del edificio situado en Sevilla y Soria</i>	<i>- 164 -</i>
<i>Tabla 23. Inventario del Ciclo de Vida.....</i>	<i>- 168 -</i>
<i>Tabla 24. Parámetros ajustados del modelo de resistencia a la flexión y a la compresión.....</i>	<i>- 247 -</i>
<i>Tabla 25. ANOVA entre densidades y propiedades mecánicas.....</i>	<i>- 251 -</i>

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Siglas/Acrónimos	Significado
2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
A	Alto % residuo
A+	Más Alto % residuo
ACV	Análisis ciclo de vida.
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
B	Bajo % residuo
BR	Polibutadieno
C	Caucho
CaSO4	Sulfato de calcio
CE	Comunidad Europea
CED	Cumulative Energy Demand
CEPCO	Cofederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción.
CF	Caucho+ Fieltro
CFM-FKM	Cauchos fluorados
CMMAD	Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo.
CN	Caucho natural
CO2	Dióxido de carbono
COP	Conferencia de las partes
CS	Caucho sintético
CTE	Código Técnico Estructural
EE	Energía incorporada
EPDM	Polietileno propileno dieno.
F	Fieltro
FAO	Food and Agriculture Organitations

GEF	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
GWP	Potencial de Calentamiento Global
H	Alto % residuo
H+	25% residuo de CF
H2O	Agua
HDPE	Polietileno de alta densidad
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning
ICV	Inventario de ciclo de vida.
IIR	Butilo
INE	Instituto Nacional de Estadística.
ITEC	Instituto de la Tecnología de la Construcción.
ITF	Internacional Tennis Federation
L	Bajo % residuo
LACV	Evaluación del impacto de ciclo de vida.
LDPE	Polietileno de baja densidad.
M	Medio % residuo
MQ	Siliconas
NBR	Caucho de nitrilo
NO	Óxido de nitrógeno
ODM	Objetivos de Desarrollo de Milenio
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMM	Organización Metereológica Mundial.
OMU	Organización Metereológica Mundial.
ONU	Organización de las Naciones Unidas
P/T	Pádel-tenis
PA	Poliamida
Pb	Plomo
PET	Polietileno tereftalato
PETE	Polietileno

PIB	Producto Interior Bruto
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PS-G	Placa Saint-Gobain
RCD	Residuos de Construcción Demolición
RD	Real Decreto
S.I	Sistema Internacional.
SBR	Styrene-Butadiene Rubber
SEM	Scanning Electron Microscope
Si	Silicio
SPI	Sociedad de la Industria de los Plásticos.
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
W/Y	Relación agua/yeso
XPS	Poliestireno Extruido

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	VI
ABSTRACT	VII
RESUMEN	IX
LISTADO DE FIGURAS	XI
LISTADO DE TABLAS	XIV
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	XV
1. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	- 3 -
1.1. SOSTENIBILIDAD Y MEDIO AMBIENTE.....	- 3 -
1.1.1. Impacto medioambiental en el sector de la construcción.....	- 6 -
1.1.2. El sector de la construcción frente a la sostenibilidad	- 8 -
1.1.3. La construcción hacia la economía circular.....	- 8 -
1.2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	- 17 -
1.2.1. Clasificación	- 20 -
1.2.2. Materiales ligantes.....	- 28 -
1.2.3. El Yeso como material de construcción	- 30 -
1.3. RECICLAJE Y RESIDUOS INDUSTRIALES	- 38 -
1.3.1. Reciclaje de los plásticos	- 40 -
1.3.2. Características y reciclaje de las pelotas de pádel/tenis.....	- 43 -
1.3.3. Residuos obtenidos en pelotas de pádel/tenis	- 45 -
1.4. CONSIDERACIONES PARCIALES	- 55 -
2. CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE	- 59 -
2.1. COMPUESTO DE YESO CON ADICIONES.	- 60 -
2.2. ANÁLISIS CICLO DE VIDA.....	- 69 -
2.3. CONSIDERACIONES PARCIALES	- 69 -
3. CAPITULO 3: JUSTIFICACIÓN.....	- 73 -
4. CAPITULO 4: OBJETIVOS.....	- 77 -
5. CAPITULO 5: METODOLOGÍA.....	- 81 -
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: YESO, RESIDUOS DE PELOTAS DE P/T (F.1.1)	- 83 -
5.1.1. Ensayos físicos	- 86 -
5.1.2. Análisis químicos, mineralógicos y observación mediante microscopía	- 87 -
5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS DE YESO Y RESIDUOS DE PELOTAS DE P/T” (F. 1.2). ..	- 88 -
5.2.1. Elaboración de probetas	- 89 -
5.2.2. Ensayos plan experimental 1ªy 2ª Parte.	- 94 -

5.2.3.	Análisis estadístico	- 106 -
5.3.	PLANTEAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE APLICACIONES CONSTRUCTIVAS EN EDIFICACIÓN, DESARROLLADAS CON LOS NUEVOS COMPUESTOS DE YESO ELABORADOS. (F. 2.1)	- 107 -
5.3.1.	Estudio teórico.	- 108 -
5.3.2.	Plan experimental.	- 111 -
5.3.3.	Resistencia al choque-impacto de las placas.	- 112 -
5.4.	EVALUACIÓN DEL BENEFICIO ENERGÉTICO Y MEDIOAMBIENTAL DE LOS COMPUESTOS (F.2.2)-	114 -
5.4.1.	Potencial de eficiencia energética.....	- 114 -
5.4.2.	Beneficio medioambiental de las nuevas placas de falso techo desarrolladas: ACV	- 121 -
6.	CAPITULO 6: RESULTADOS (OBJ 1).....	= 125 =
6.1.	CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA (Fase 1.1).....	- 126 -
6.1.1.	Ensayos Físicos.....	- 126 -
6.1.2.	Análisis Mineralógico	- 127 -
6.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS (Fase 1.2)	- 128 -
6.2.2	Ensayos plan experimental 1ª Parte.	- 128 -
6.2.3	Análisis estadístico.....	- 136 -
6.2.2	Ensayos plan experimental 2ª Parte.	- 139 -
7.	CAPITULO 7: RESULTADOS (OBJ 2).....	= 155 =
7.1.	CARACTERIZACION DE LAS APLICACIONES CONSTRUCTIVAS (Fase 2.1).....	- 156 -
7.1.1.	Estudio Teórico	- 156 -
7.1.2.	Estudio Experimental	- 157 -
7.1.3.	Resistencia al Choque-Impacto de las Placas.....	- 158 -
7.2.	EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO ENERGETICO Y MEDIOAMBIENTAL (Fase 2.2).....	- 158 -
7.2.1.	Potencial de eficiencia energética	- 158 -
7.2.2.	Beneficio Medioambiental de los Compuestos: ACV.	- 165 -
8.	CAPITULO 8: CONCLUSIONES.....	= 173 =
9.	CAPITULO 9: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	= 177 =
	REFERENCIAS.....	= 181 =
	TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN.....	= 195 =
	ANEJOS.....	= 199 =
A.1:	PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS	- 201 -
A.2:	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	- 246 -

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 01.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

A pesar de la creciente sensibilidad y preocupación por parte de la sociedad actual sobre los impactos que las diferentes actividades provocan en el medioambiente, no es frecuente relacionar deporte con residuos y contaminación. No obstante, se generan toneladas de residuos procedentes de las pelotas de pádel/tenis (P/T) usadas. En esta investigación se estudia la posibilidad de reutilizar las pelotas desechadas que se fabricaron a partir de caucho natural vulcanizado revestido de una combinación de lana y fibras sintéticas (nylon). Es un conjunto insustituible por el momento, debido a las características que otorga a las pelotas de tenis y que establece la Federación Internacional de Tenis (ITF) como son: rebote, compresión, peso, diámetro, etc. pero tiene el inconveniente de su dificultad de reciclaje y eliminación si no es por incineración. Por lo tanto, se hace necesario investigar métodos y formas de recuperación que permitan la valoración y reutilización de estos residuos.

En este trabajo se utiliza el yeso como material de construcción y se mezcla con fragmentos procedentes de la trituración de las pelotas P/T, así como el de los restos del proceso de fabricación. Se pretende obtener un producto que mejore algunas de las propiedades tradicionales del yeso y que cumpla con la normativa específica.

Esta introducción se ha articulado con la siguiente estructura:

1.1 Sostenibilidad y Medio ambiente.

1.2 Materiales de Construcción.

1.3 Reciclaje y residuos industriales.

1.1. SOSTENIBILIDAD Y MEDIO AMBIENTE.

La conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano celebrada en Estocolmo, Suecia, en 1972, fue la primera conferencia mundial que situó los aspectos medioambientales en el primer plano de las preocupaciones internacionales y marcó el inicio del diálogo entre los países sobre el vínculo entre el crecimiento económico, la contaminación del aire, el agua y el bienestar de las personas de todo el mundo, adoptando los países participantes, 26 principios para la gestión racional del medioambiente [4]. Uno de los resultados de la Declaración de Estocolmo fue la creación del Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA). Unos años más tarde en 1983, la ONU desarrolla

la Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD) en la que a través de diferentes acuerdos, programas y actividades, se intenta solucionar los problemas relacionados con el medio ambiente. Pero no fue hasta el año 1991, cuando se implantó el Fondo para el Medio Ambiente (GEF) a través del cual se financiaban proyectos ambientales a nivel mundial.

En Junio de 1992, se celebra en Río de Janeiro la “Cumbre para la Tierra” [5], donde las Naciones Unidas desarrollan un plan para el desarrollo y protección ambiental denominado Programa 21. Mediante este programa, se intenta concienciar sobre el desarrollo y cooperación ambiental, estableciendo planes y estrategias nacionales para el desarrollo sostenible que queda definido por su objetivo “Satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la posibilidad de que las futuras puedan satisfacer las suyas”.

En los años siguientes se celebraron diferentes Asambleas Generales dedicadas a abordar la problemática ambiental.

El compromiso por una cooperación global por parte de los líderes mundiales aparece en el cambio de milenio. En la “Cumbre del Milenio” celebrada en septiembre del año 2000 se establecen ocho objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) [6].

El avance sobre el desarrollo sostenible desde 1992, fue muy lento. Por ello, en 2002 se planteó un nuevo plan de acción en la “Cumbre Mundial sobre el desarrollo Sostenible de Johannesburgo”[7] . Se abordaron 5 objetivos fundamentales para la mejora del medio ambiente. Entre los años 2005 y 2010, se revisaron los Objetivos de Desarrollo del Milenio en diferentes reuniones celebradas en la ciudad de Nueva York.

En 2015, se lleva a cabo en París un pacto global, con el objetivo de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, se trata del “Acuerdo de París”[8]. Por otro lado, la Asamblea de las Naciones Unidas celebrada en septiembre de 2015 [9] sobre el Desarrollo Sostenible, dio origen a la Agenda 2030 y sus diecisiete objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que se muestran en la Figura 1.

El propósito de los ODS es guiar a los países hacia un desarrollo más sostenible y equitativo, abordando desafíos globales y promoviendo un futuro mejor para todos.



Figura 1. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: web de la ONU:

<https://www.un.org>. [10]

En el ámbito de la construcción, los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU son fundamentales para promover prácticas y proyectos que contribuyan al desarrollo sostenible. Específicamente o de forma indirecta, se recogen en los siguientes:

- ODS 6: “Agua limpia y saneamiento”: Garantizar el acceso universal a servicios de agua potable y saneamiento adecuados, lo cual es esencial en la planificación y diseño de proyectos de construcción.
- ODS 7: “Energía asequible y no contaminante”: Fomentar el uso de energías renovables en la construcción y promover la eficiencia energética en edificaciones y obras civiles.
- ODS 9:” Industria, innovación e infraestructura”: Promover la construcción de infraestructuras resilientes, sostenibles e innovadoras, así como fomentar la industrialización sostenible.
- ODS 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”: Busca garantizar el acceso a viviendas seguras, asequibles y sostenibles para todos, así como mejorar la planificación y gestión urbana, incluyendo el transporte público y el uso eficiente del espacio.
- ODS 12:” Producción y consumo responsables”: Fomentar la construcción de edificios e infraestructuras que minimicen el consumo de recursos naturales y la generación de residuos.

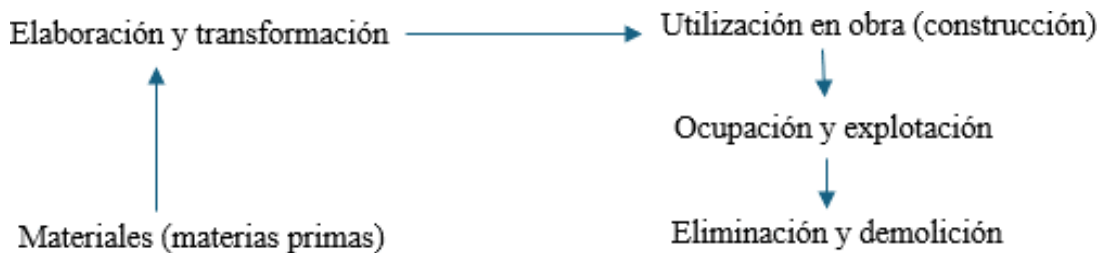
- ODS 13: “Acción por el clima”: Promover prácticas de construcción sostenible que reduzcan las emisiones de carbono y fomenten la adaptación al cambio climático.

Integrar estos ODS en la planificación, diseño y ejecución de proyectos de construcción contribuye no solo al desarrollo sostenible, sino también al bienestar de las comunidades y al medio ambiente.

1.1.1. Impacto medioambiental en el sector de la construcción

La industria de la construcción en todo su desarrollo es uno de los 7 sectores con más impacto ambiental, suponiendo un 12% del total de los residuos nacionales y produciendo una cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD) que supera la tonelada anual por habitante [11].

El proceso que sigue la industria de la construcción a partir de la extracción de la materia prima se puede ilustrar de forma esquemática de la siguiente manera:



En cada una de las fases se produce consumo energético y se generan residuos. La forma de minimizar cada uno de estos aspectos contaminantes pasa por:

- Selección y mejora de obtención de los recursos naturales.
- Empleo de energías renovables en el proceso industrial de la obtención de productos y establecer un programa de gestión de los residuos.
- En la fase de construcción, mejora de los procedimientos constructivos y planes de formación de los trabajadores de la construcción en aspectos medioambientales.
- En la reutilización de los residuos, incorporándolos en algunas de las fases de:
Materiales → Elaboración → Construcción.
- Construcción de edificios sostenibles y ecoeficientes.

Dentro de los objetivos de las distintas fases del proceso constructivo, se encuentran los dirigidos a disminuir al mínimo los residuos que acaban en vertederos y a eliminar las emisiones que contaminan el aire, el agua y el suelo. No obstante, la contaminación ambiental no solamente se evita con la gestión y el tratamiento de los residuos, sino que, actividades cotidianas también producen emisiones que afectan al aire, agua y al suelo. Para reducirlas, se pueden adoptar las siguientes medidas:

- Aire
 - Utilización de productos menos contaminantes respaldados por sellos de calidad como por ejemplo pinturas con disolventes orgánicos.
 - Puesta a punto de la maquinaria, utilización y rendimiento para conseguir una baja emisión de gases.
 - Dotar a las zonas de generación de polvo, de sistemas de extracción centralizados para facilitar su eliminación.
 - Utilizar medidas efectivas que pueden ser tan sencillas como humedecer el frente de trabajo para reducir la emisión de polvo.
 - Controlar que, en determinados horarios, las zonas que producen ruido, esté dentro del límite permitido.

- Agua

El agua está presente en todas las obras. Se emplea para las mezclas conglomerantes, en estructuras, limpieza, etc. produciendo un agua residual que va al sistema de saneamiento general en zonas urbanas y, en zonas rurales, se producen vertidos ríos y arroyos.

El agua residual está contaminada por distintos productos que, al incorporarse al ciclo del agua, dificultan la depuración e indirectamente, contaminan productos que se incorporan a la cadena alimentaria como, derivados lácteos, pescados y carnes. Se puede reducir tomando las siguientes medidas:

- Utilizando métodos de depuración previos al vertido.
- Control del consumo de forma específica limitando el abuso y desperdicio.

- Cuando contengan productos muy contaminantes y de difícil eliminación, se debe contratar a empresas que se dedican a este tipo de eliminación de residuos.

- Tierra

Las edificaciones se construyen sobre el terreno. La extracción de materias primas y los vertidos incontrolados afectan a su estructura y a su composición. Debido a los residuos que no se tratan debidamente, se produce contaminación del suelo y de las aguas freáticas que posteriormente, se incorporan a la red de agua potable y afectan también a la vegetación y el paisaje. Por lo tanto, se hace necesario controlar los vertidos al terreno, sobre todo los que contienen sustancias contaminantes mediante la reparación y revisión de saneamientos existentes. Otra medida en caso de no existir red de saneamiento, es establecer una en obra o contratar servicios de eliminación de líquidos contaminantes.

1.1.2. El sector de la construcción frente a la sostenibilidad

La industria de la construcción genera una cantidad significativa de residuos, siendo responsable del 35% de los residuos industriales a nivel mundial. En Europa, se generan más de 450 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) al año, produciéndose en España alrededor de 35 millones de toneladas.

Las emisiones de CO₂ son, en gran parte, responsables de la contaminación atmosférica y por tanto, del cambio climático, según se expone en el informe del Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente sobre el consumo de energía y las emisiones de CO₂ [12]. En el sector de la construcción, las emisiones de CO₂ han repuntado de manera notable después de la pandemia del COVID-19 hasta alcanzar máximos históricos. En la Conferencia sobre el clima de la COP27 celebrada en Egipto en 2022 [13], se concluye que en el sector de la construcción la demanda energética es del 34% del total y es responsable del 37% de las emisiones de CO₂. Estos valores son un 5% más altos a los niveles alcanzados en el año 2020 y un 2% superiores a los registrados en 2019.

El 80% de la demanda de energía procede de combustibles fósiles. Se hace necesario que, de forma progresiva, se vayan sustituyendo por energías renovables. Se debe fomentar

y proteger la investigación para aumentar el número de posibilidades de producción energética, que no afecten a la contaminación medioambiental.

Los efectos producidos por el calentamiento global, se reflejan en el último informe de la Organización Meteorológica Mundial (OMU) para la conferencia de las Naciones Unidas sobre cambio climático en COP28 [14]. La Figura 2 muestra el informe sobre el desfase en las emisiones.

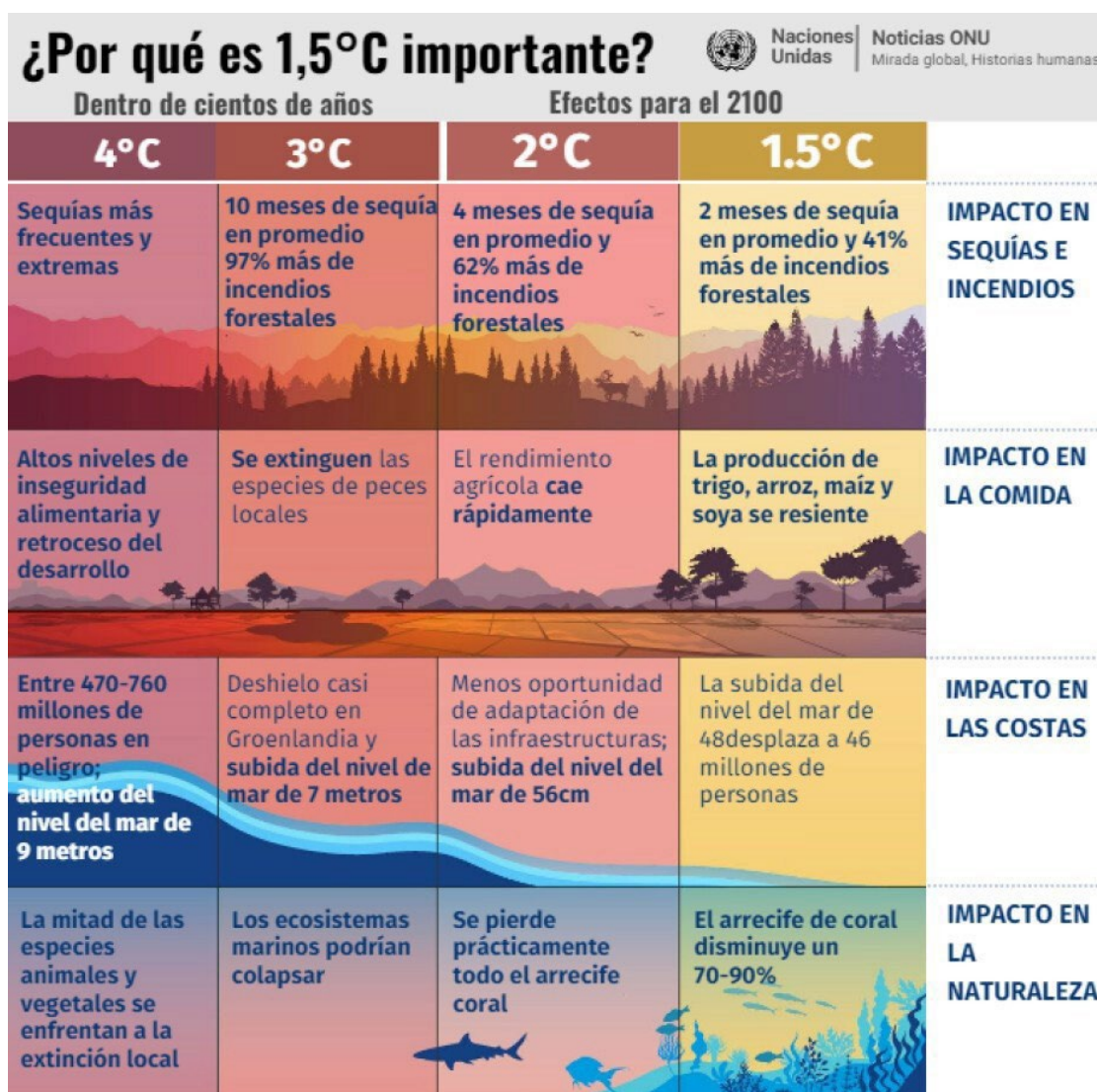


Figura 2. Informe sobre el desfase en las emisiones PNUMA (2017-2021) [14]

La problemática del sector de la construcción es analizada a través de la Alianza Mundial para Edificios y Construcción dentro del programa de la ONU para el medio ambiente. Del informe elaborado en 2022, se disecciona y analiza el estado actual de la construcción mundial. También se establecen estrategias para encarar un futuro sostenible del sector y el estado de los compromisos adquiridos por la industria en los Acuerdos de París [8] .

La tendencia de la construcción a nivel global en los diferentes ámbitos y según se refleja en el informe del Programa de la organización de Naciones Unidas (PNUMA) [15] se resume en:

- La intensidad de emisión de los edificios ha descendido un 7%, cifra considerable pero inferior al objetivo marcado.
- Aumento de la superficie construida en un 11%.
- El consumo energético se ha mantenido con una variación en menos del 0,7%.
- Se han establecido códigos de identificación de edificios con sus gastos y consumos.
- Se han establecido leyes y normativas a nivel nacional en distintos países, por ejemplo, la Ley de Calidad de la Arquitectura Española [16] .

Entre las medidas a tomar para minimizar los impactos mencionadas en el informe destacan:

- Aumentar el ciclo de vida de los materiales.
- Estrategias de eficiencia de los materiales, como el uso de materiales reciclables y reciclados.
- Establecimiento de hojas de ruta por el gobierno con financiación suficiente.
- Establecimiento de códigos obligatorios de eficiencia energética en los edificios.
- Sustituir procesos lineales de materiales contaminantes por los que se pueden gestionar de manera sostenible.

Como ya se ha comentado, en las distintas fases del proceso constructivo (extracción de materias primas, transformación y elaboración de materiales, etapa de construcción, utilización, demolición y vertido) se producen efectos contaminantes [17] que afectan a un futuro sostenible. Por lo tanto, se debe actuar sobre cada una de las etapas para que, de forma

global, se obtenga un resultado que contribuya a la sostenibilidad del planeta y se cumplan los acuerdos establecidos tanto a nivel nacional como internacional. A continuación, se exponen posibles estrategias de actuación en las diferentes etapas del proceso constructivo:

- En la fase de diseño y proyecto, se establecen las formas y condiciones técnicas del edificio, por lo tanto, es necesario que se cumplan todas las normativas, diseñando proyectos sostenibles.
- Utilizar materiales menos contaminantes y con menor demanda energética, difícil misión si se tiene en cuenta que la fabricación de cemento y acero son de lo que más consume energía y contaminan, con difícil sustitución.
- Procesos constructivos menos contaminantes en todas sus formas de consumir energía, ruido, residuos.
- Edificios bien aislados térmicamente en función del clima de la zona, el exceso de aislamiento que no demanda la zona de la ubicación, lleva a derroche de medios y a consumos de materiales ineficaces, como hace referencia Gómez Pulido, Pilar en su libro [18].
- Utilización de energías renovables tanto en la ejecución como en la vida útil del edificio.
- Prioridad a los materiales reutilizables, así como a los medios de ejecución que permitan su fácil retirada.
- Exigir tanto en materiales como en los procesos y en la calificación de los edificios marcas de calidad que están respaldadas por organismos autonómicos y de garantía.
- Establecer códigos y sistemas de explotación de los edificios.
- Renovación y rehabilitación del parque de edificios con construcción deficiente para incorporarlos a la arquitectura sostenible.

1.1.3. [La construcción hacia la economía circular](#)

La industria de la construcción en todo su desarrollo histórico prácticamente no ha evolucionado en cuanto al concepto económico del proceso que se ha desarrollado dentro del modelo lineal:

Extracción → Fabricación → Utilización → Eliminación.

En este proceso intervienen numerosos agentes económicos, técnicos y materiales, con el fin de obtener un beneficio y sin tener en cuenta el impacto negativo que se pueden producir en cada fase.

En la *fase de extracción* de los materiales se produce un agotamiento de materias primas naturales acompañadas del efecto negativo sobre el paisaje y contaminación del terreno.

Durante *la fabricación*, se han ido mejorando los procesos de obtención, disminuyendo las emisiones de efecto invernadero, con la sustitución paulatina de combustibles fósiles por energías renovables. Actualmente, se empieza a legislar en esta dirección como en el caso de España que ha aprobado la “Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía circular” de aplicación en el contexto español. En ella se destacan los artículos 18 y 26 en cuanto a la exigencia de reducir la generación de residuos [19]. Por otro lado, a nivel global, se están imponiendo hitos prácticamente todos los años en las distintas reuniones celebradas como la última Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en noviembre de 2023 en los Emiratos Árabes [14].

En edificación, hasta finales de siglo XX, no se comenzó a tener en cuenta aspectos como el consumo energético o las emisiones contaminantes generadas. Esto fue debido tanto a la falta de normativa, como a la limitación de los materiales utilizados. Por fortuna, tanto a nivel mundial como nacional, los diferentes gobiernos comienzan a legislar en la dirección de conseguir mejorar en cuestiones medio ambientales publicando normativas de ámbito estatal y autonómico.

La eficacia de los edificios en cuanto a consumo energético y emisiones contaminantes es proporcional a la calidad de las instalaciones, los aislamientos, y a la orientación.

Actualmente, los proyectos de construcción, además de otras consideraciones, deben cumplir con una normativa cada vez más exigente en los aspectos de sostenibilidad. Una forma de contribuir es mediante la incorporación de materiales con características adecuadas y con menor impacto. También se debe tener en cuenta la posibilidad de reutilización de los residuos procedentes de la construcción y, sobre todo, en la fase de demolición (actividad que debe encaminarse hacia un desmontaje y reutilización y no acabar en el vertedero).

Por lo tanto, una de las medidas más eficaces para reducir los impactos ambientales, es intentar volver a incorporar la mayor parte de desechos al proceso constructivo, es decir, aplicar el concepto de “economía circular” que supone un cambio fundamental desde el tradicional modelo economía lineal. Se enfoca en la reutilización de materiales, minimización de recursos y la eficiencia en el uso de recursos. La nueva construcción, se debe basar en este modelo de economía circular y en la transición energética y ecológica. (Figura 3).



Figura 3. Economía circular en la edificación. Fuente: propia.

Actualmente, el conocimiento de economía circular en la sociedad, se puede representar según el informe de Deceuninck [20] que ilustra la Figura 4. Se puede observar que el conocimiento de la economía circular va en aumento. Para que exista economía circular, ha de obtenerse un beneficio. Los encuestados dejan claro que la posibilidad de utilizar materiales reciclados será proporcional a su menor coste.

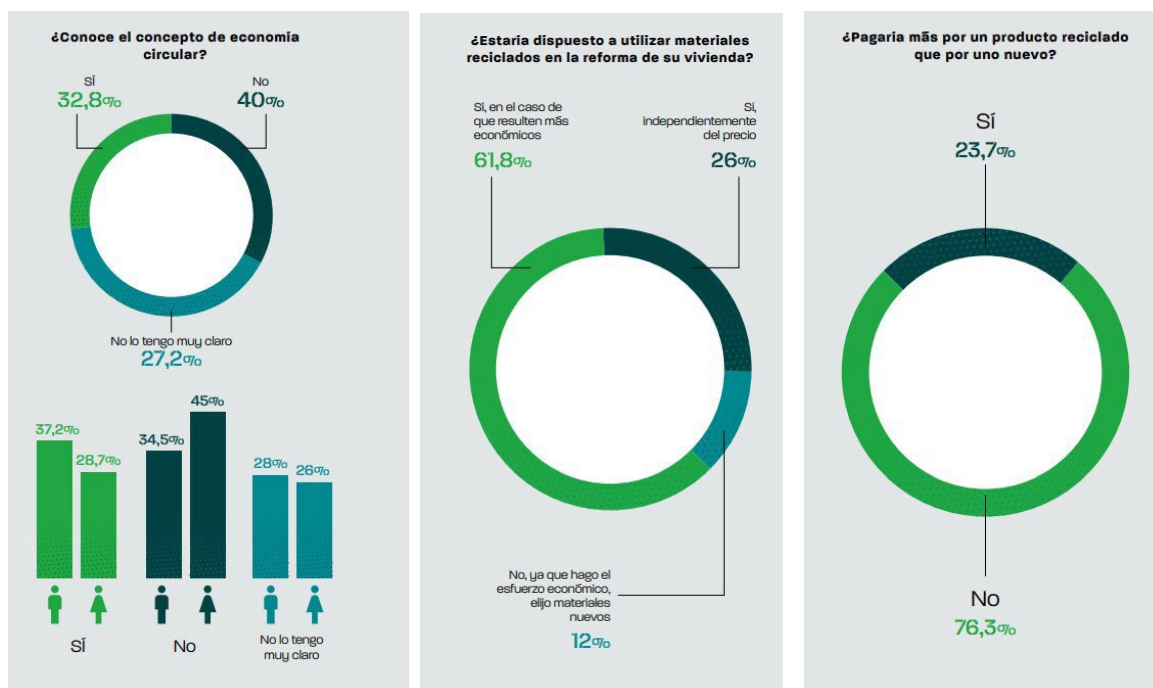


Figura 4. Percepción de los ciudadanos: Sobre economía circular. Fuente: Deceuninck [20].

Dos de los hitos más inmediatos que hacen necesaria la aparición de la economía circular son: en primer lugar, las materias primas no son infinitas; son limitadas y no reproducibles a corto/medio plazo. En segundo lugar, el consumo de combustibles fósiles para producir energía ocasiona unos gases de efecto invernadero que son el motivo del calentamiento del planeta. Las medidas a tomar sobre los recursos finitos quedan definidas en los siguientes puntos:

- ✓ Prolongar la vida de los edificios existentes por medio de acciones de rehabilitación.
- ✓ Diseño de edificios nuevos más duraderos en los que se emplean materiales reciclados y reciclables al final de su vida.
- ✓ Procesos constructivos que permitan la deconstrucción (desmontaje por componentes) y evitar la demolición.
- ✓ Reciclado de los residuos de forma que sean incorporados a la economía circular.
- ✓ Creación e investigación de nuevos materiales que se obtengan de residuos propios y de otras industrias.

El control sobre la contaminación producida por los gases de efecto invernadero, debe ir avanzando para hacer posible la desaparición del calentamiento de la superficie terrestre y las implicaciones en los desastres naturales. De tal manera que, como se ha mencionado anteriormente, en la industria de la construcción se minimizara la utilización de materias primas, se proyectaran edificios sostenibles que emitan menos gases de efecto invernadero y que sean más eficientes, además se intentará sustituir las energías que provengan de combustibles fósiles, sustituyéndolas por energías renovables o hidroeléctricas.

Los líderes mundiales en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (COP21) celebrada en París[21], consiguieron establecer unos objetivos a largo plazo:

- Limitar el aumento global de la temperatura a 2°C en este siglo y esforzarse para limitarlo a 1,5°C.
- Revisar los compromisos cada 5 años.
- Ofrecer financiación a los países en desarrollo para que puedan mitigar el cambio climático, fortalecer la resiliencia y mejorar su capacidad de adaptación a los impactos del cambio climático.

Hasta el momento, se han celebrado 28 conferencias internacionales. La última de ellas, “COP28” se celebró en Dubái, Emiratos Árabes Unidos y finalizó el 15 de diciembre de 2023. En esta conferencia se establece como objetivo global que la temperatura no ascienda 1,5°C, y se pactó la transición para abandonar los combustibles fósiles, de forma que se alcance el cero neto en 2050.

La construcción en su conjunto es el sector de la industria de mayor entidad dentro de la actividad económica española, aumentando cada año el volumen construido y estando a la cabeza la mano de obra. El comportamiento según los datos del “Observatorio Industrial de la Construcción” [3] en su informe del 2022 se refleja en la figura 5:

Sector de construcción en cifras, 2022.	Crecimiento de las empresas.	Representación PIB	Aumento visados obra nueva.	N.º Trabajadores afiliados	Licitación Plica	Consumo de Cemento
	16,20%	+ 4,76%	0,50%	+ 3,50%	27,90%	- 0,80%

Figura 5. Comportamiento del sector de la construcción,2022.Fuente: propia según los datos del Observatorio Industrial de la construcción.[3]

El sector de la construcción ha representado más del 10% del PIB de país durante el final del siglo XX y durante los primeros años del siglo XXI [22]. En el año 2008 y hasta el 2014 el país sufre una gran crisis económico-financiera que afectó de forma notable al sector de la edificación llegando a representar una pérdida del 50% en tan solo seis años. A partir de 2014 se empieza a recuperar lentamente (Figura 6). Los estudios de la evolución de la construcción predicen un aumento sostenido y, en los próximos diez años, puede llegar a situarse por encima del 8% del PIB lo que indica una recuperación del sector y su importancia en la economía española.

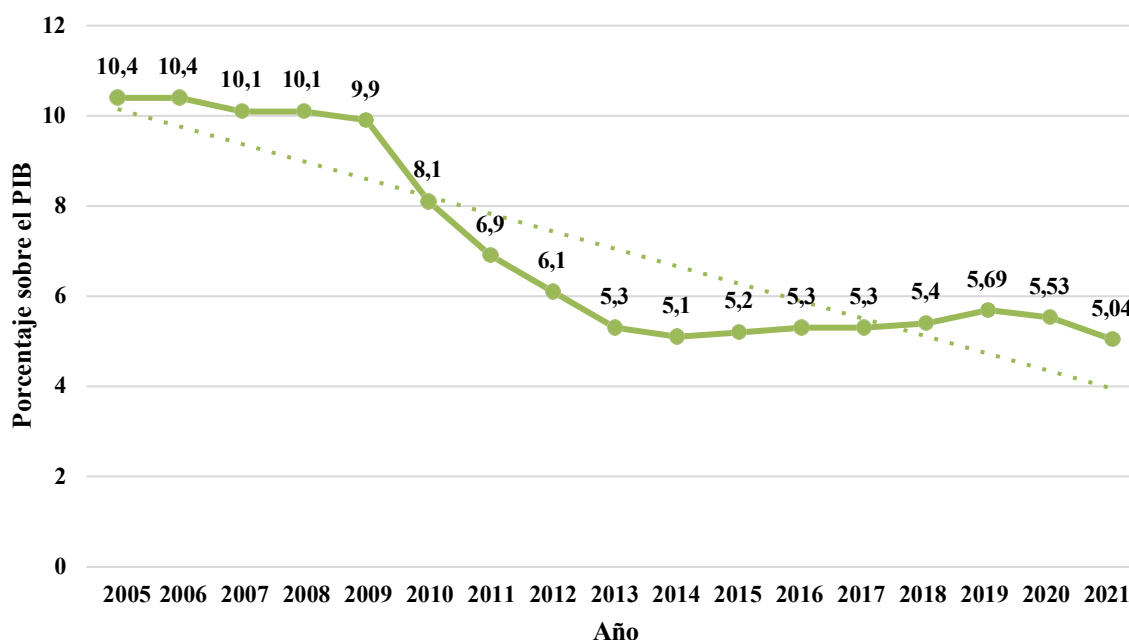


Figura 6. Aportación al PIB en España 2005-2021. Fuente: Propia de los datos recogidos en <https://es.statista.com>

Como ya se ha mencionado, el sector de la construcción es una de las industrias que más responsabilidad tienen sobre el consumo de materias primas y la producción de gases de efecto invernadero y, por tanto, de la contaminación en diversos estados. Para minimizar esta situación se puede actuar sobre dos aspectos: por un lado, disminuir de forma progresiva los elementos que producen la contaminación y, por otro, utilizar la industria de la

construcción como vehículo y emplear residuos que provengan de otras industrias y que no sea posible introducirlos en su propia economía circular.

Dichos residuos se podrán considerar como materias primas que se logran incorporar a otras economías circulares distintas de su origen de producción.

Actualmente, se están incorporando continuamente nuevos materiales y realizando investigaciones de utilización y aportación de materiales procedentes de residuos desechables de otros sectores de la industria contribuyendo a reducir los residuos que terminan en vertederos.

En esta investigación se va a estudiar la posibilidad de reutilizar residuos de caucho natural vulcanizado y fieltro procedentes del deporte pádel/tenis mezclandolos con un yeso comercial. Se pretende obtener un material innovador que permita su utilización en condiciones similares al resto de unidades de obra en la que se utilice sólo el yeso como material constituyente de prefabricados, y dar respuesta a las exigencias indicadas anteriormente de aprovechamiento de residuos. Por otro lado, la sustitución de parte del yeso por caucho y fieltro, además de la reducción de emisiones de CO₂ que conlleva el proceso de fabricación y cocción del yeso, ayuda a la conservación de canteras de aljez (mineral del yeso) debido a la menor utilización de este material y contribuyendo así a preservar el paisaje.

1.2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Según la definición de materiales de construcción de Axel Francisco Martínez Nieto "*son elementos destinados a formar parte de la composición de una obra de infraestructura*" [23]. Estos pueden derivarse de materias primas naturales como rocas, arenas, arcillas y madera, de procesos industriales como el cemento, acero o vidrio, o de procesos de síntesis como poliuretano, acrílicos y plásticos. Además, pueden ser combinaciones de estos, como en el caso de los hormigones y morteros (materiales compuestos). La selección del material depende de las características específicas de la construcción a realizar. La variedad de materiales de construcción disponible es enorme ya sea desde un punto de vista de la composición, las propiedades, comportamiento o por la posibilidad de reutilización.

La relevancia de los materiales de construcción ha evolucionado a lo largo de la historia. Desde los primeros asentamientos humanos, las personas utilizaron los recursos naturales disponibles como la piedra y la madera para modificar su entorno y hacerlo más habitable, proporcionando refugio y seguridad frente a amenazas externas. Así surgieron los primeros materiales de construcción. Hacia el año 6000a.C-1200 a.C con el desarrollo de la agricultura y los primeros enclaves urbanos, comenzaron a utilizarse el adobe y ladrillos cocidos para la construcción de viviendas más duraderas. A partir del 5000 a .C surge la metalurgia, que se inició con la Edad de cobre, cuyo material se utilizaba para la elaboración de piezas decorativas. Alrededor del 3000 a.C y hasta el 800 a.C se experimenta con este metal y se fabricaron aleaciones más resistentes como el bronce (cobre y estaño) y denominándose a este periodo la Edad del Bronce. Posteriormente, el ser humano descubrió el hierro metal, obteniendo gran importancia a partir del 1200 a.C y sobre todo en Oriente próximo, la región del mar Egeo y la India denominándose a ese período Edad de Hierro [24].

Otro de los materiales más antiguos es el vidrio. Se cree que hacia el año 200 a.C el pueblo fenicio lo descubrió por casualidad. Los egipcios comenzaron a utilizarlo como vidrio soplado y posteriormente, los romanos durante los años 27 a.C- 476 d.C emplearon el vidrio, no sólo como vasijas y elementos de decoración, sino que los introdujeron en la arquitectura. Se emplearon en catedrales y castillos a modo de ventanales y vidrieras durante la Edad Media y durante el período gótico[25] .

Los conglomerantes como la cal y el yeso debido a su fácil obtención a bajas temperaturas, y su abundancia en la naturaleza son materiales utilizados desde la antigüedad [26] [27]. En el asentamiento más antiguo del que aún hay restos, la ciudad de Catal Hüyük en Anatolia, Turquía, correspondiente al período neolítico (6600-5600 a.C), se han encontrado tanto morteros de cal como de yeso en pinturas al fresco y revestimientos. A lo largo de la historia, éstos conglomerantes fueron evolucionando y, en el período romano, se mezclaron con calizas, arcillas, cenizas volcánicas... resultando un material denominado "cemento romano", con propiedades puzolánicas y que revolucionó la construcción permitiendo la construcción de estructuras como el Coliseo y el Panteón en Roma[28].

A principios del siglo XVIII, surgieron los "conglomerantes hidráulicos" gracias a John Smeaton que descubrió que las calizas que contenían impurezas de arcilla eran más resistentes al agua.

A finales del siglo XVIII y comienzos del XIX la industria siderurgia alcanzó su gran apogeo gracias al desarrollo del proceso de laminado del hierro por Henry Cort, y al químico francés Henri Étienne Sainte-Claire Deville que aisló el aluminio en forma metálica.

La aparición de los plásticos en el siglo XIX marcó un nuevo hito en la construcción, con nuevos descubrimientos a lo largo de los años.

A medida que el mundo se ha ido desarrollando y a partir de la Revolución Industrial, los avances tecnológicos han permitido la aparición de nuevas técnicas de procesado de materias primas, que se adaptan mejor a los objetivos estructurales y arquitectónicos más complejos. También se han desarrollado aleaciones y materiales compuestos combinando elementos para crear productos más resistentes y duraderos. Actualmente, la industria es capaz de sintetizar nuevos materiales para satisfacer nuevas necesidades constructivas.

1.2.1. Clasificación

Los materiales de construcción atendiendo a su origen y microestructura, se pueden clasificar de la siguiente manera:

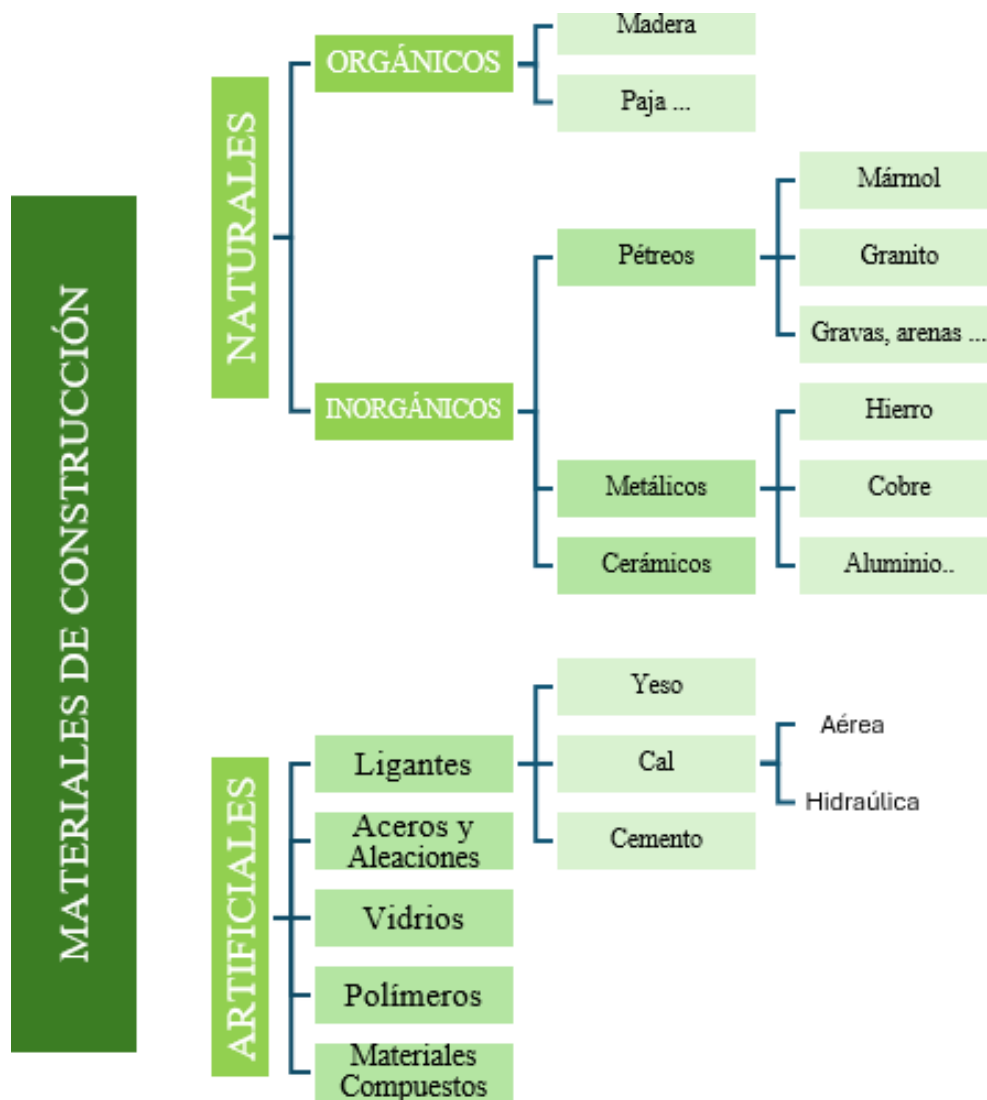


Figura 7. Clasificación de los materiales. Fuente: Propia

A continuación, se describen brevemente los tipos de materiales mencionados:

NATURALES

- **Materiales Orgánicos:**

Son materiales que tiene origen animal o vegetal, tratados de diferentes maneras para poder ser utilizados en construcción sin modificar sus propiedades químicas, ni físicas. Son materiales ecológicos y muy reciclables. Destacando: a la paja, el corcho, hoja de palma...por ser ligeros, flexibles y buenos aislantes térmicos y acústicos. Y, por otro lado, a la madera, bambú etc por su gran resistencia mecánica y versatilidad.



Figura 8. Ejemplos materiales Orgánicos (Corcho, paja, madera, bambú). Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

- **Materiales Inorgánicos:**

Materiales Pétreos:

Son agregados de partículas minerales naturales: duros, resistentes al desgaste, corrosión y oxidación, con puntos de fusión elevados y suficiente resistencia mecánica. Entre los que podemos destacar el mármol, granito, arenas, gravas etc. Utilizados en construcción para cubiertas, solados, construcciones ornamentales, como materia prima para elementos compuestos etc



Figura 9. Materiales Pétreos: Granito, mármol, pizarra y grava. Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

Materiales Metálicos:

Según Blázquez, Víctor Manuel [29] los materiales metálicos son “ sustancias inorgánicas constituidas por uno o más elementos metálicos o la combinación de un metal y un no metal siempre que el conjunto posea propiedades metálicas”. Son buenos conductores de la electricidad, dúctiles, maleables y resistentes y con altas densidades por lo general. Los más utilizados en construcción son: el cobre, hierro, aluminio...



Figura 10. Materiales metálicos: Aluminio, cobre, hierro. Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

Materiales Cerámicos:

Productos obtenidos generalmente de las arcillas y otras materias primas, en forma de polvo o pasta, que después de someterlos a cocción sufren un proceso físico-químico, obteniendo así una consistencia pétreo. Cuyas propiedades generales son gran resistencia a altas temperaturas, a la corrosión, a los agentes químicos y atmosféricos. Así como gran aislante térmico y eléctrico.

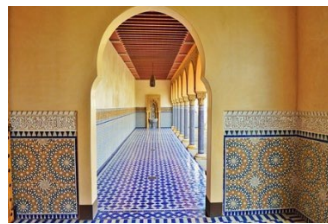


Figura 11. Materiales cerámicos. Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

ARTIFICIALES

- **Ligantes:**

Son aquellos materiales que sirven como material de unión. Sufriendo sólo transformación física para conseguir una consistencia sólida denominándose **aglomerantes**; como es el caso de arcillas, barros y derivados del petróleo. Sin embargo si, además de la transformación física, se produce una transformación química en presencia del agua; son los **conglomerantes**. Destacando a los **yesos**, cales y cementos. Utilizados en construcción para la formación de pastas, morteros y hormigones. Aportándoles plasticidad, resistencia y manejabilidad.

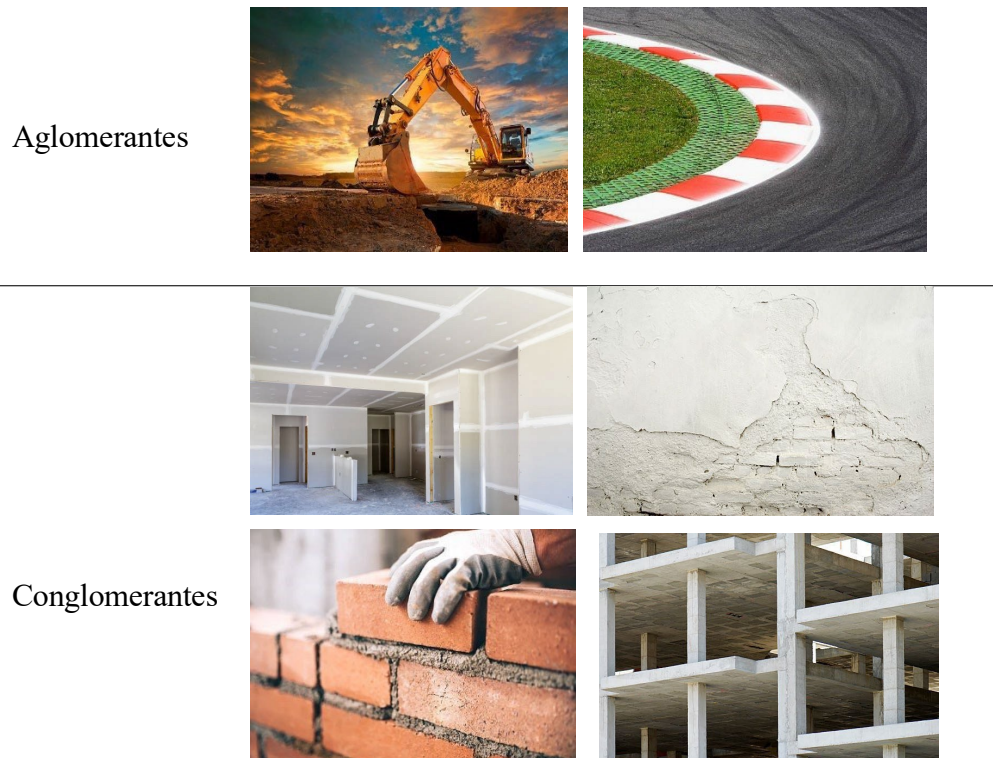


Figura 12: Aglomerantes (arcilla, alquitrán), Conglomerantes (yeso, cal, cemento) Fuente:
<https://www.istockphoto.com/>

- **Acero y Aleaciones:**

Se considera aleación a la mezcla entre dos o más elementos, uno de ellos metálico. Para conseguir un material resultante con características mejoradas fruto de la fusión de las propiedades de los elementos que lo componen. Como es el caso del latón, zinc, bronce que mejoran el comportamiento térmico, eléctrico; así como, su dureza, maleabilidad o ductilidad.

En la construcción una de las aleaciones más utilizadas es el acero que es una solución sólida (aleación) de carbono en hierro, con un contenido de carbono inferior al 2%. Es un material dúctil, maleable, resistente, forjable y soldable.

En construcción se emplea en unidades de obra que van desde las estructuras hasta decoración y unidades de terminación de obra. También se emplea como armaduras para el hormigón armado.

Desde el punto de vista de reciclaje, es un material 100% reutilizable. Bien como adaptaciones de nuevo uso o bien introduciéndolo en la economía circular como nueva materia prima proveniente de la fundición.

La problemática surge en su obtención en siderúrgicas, donde se consume gran cantidad de energía procedente de combustibles fósiles con desprendimiento de gases de efecto invernadero.

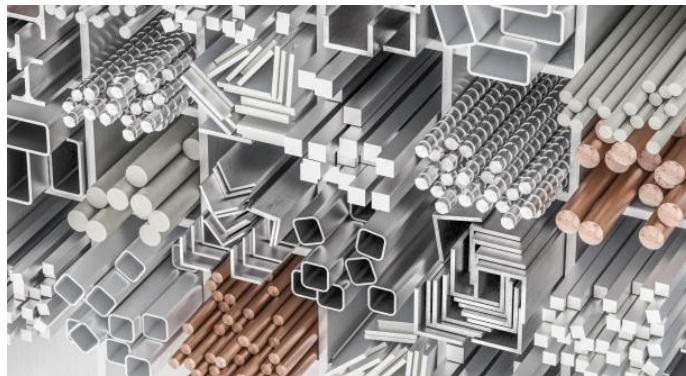


Figura 13: Materiales metálicos (aluminio, zinc, cobre...) Fuente:
<https://www.istockphoto.com/>

- Vidrio:

La forma de construir ha ido variando conforme se ha ido desarrollando la técnica de fabricación del vidrio. La gran revolución arquitectónica llegó con la invención del procedimiento de fabricación del sistema Pilkinton de vidrio plano flotado. Los huecos en fachadas se agrandan con la aparición de vidrios de mayor tamaño. Llegando en la actualidad, a realizarse totalmente fachadas de vidrio. Su obtención precisa de un alto consumo de energía y generando gases contaminantes, debido a su fase principal de fusión de las materias primas. Sin embargo, es altamente reciclable, utilizando sus residuos en otras unidades de obra o fundiéndoles e incorporándolos como nuevos vidrios.

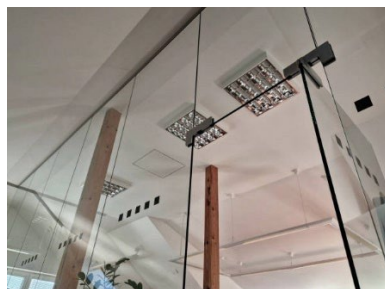


Figura 14:Aplicaciones vidrio. Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

- **Polímeros:**

Son materiales derivados del petróleo y de productos orgánicos, existen gran variedad (plásticos, pinturas, resinas ...). Su obtención y elaboración tiene altos consumos. En construcción se encuentra desde las cimentaciones hasta los materiales de acabado. Llegando a sustituir a productos pétreos, a elementos resistentes a instalaciones de cobre, plomo, así como a cerramientos de aluminio y acero. Han mejorado en general a los materiales que sustituyen, incluso a nivel de residuos, pues en general son reciclables fácilmente en otros productos, pero no así, el consumo energético ni la contaminación atmosférica.

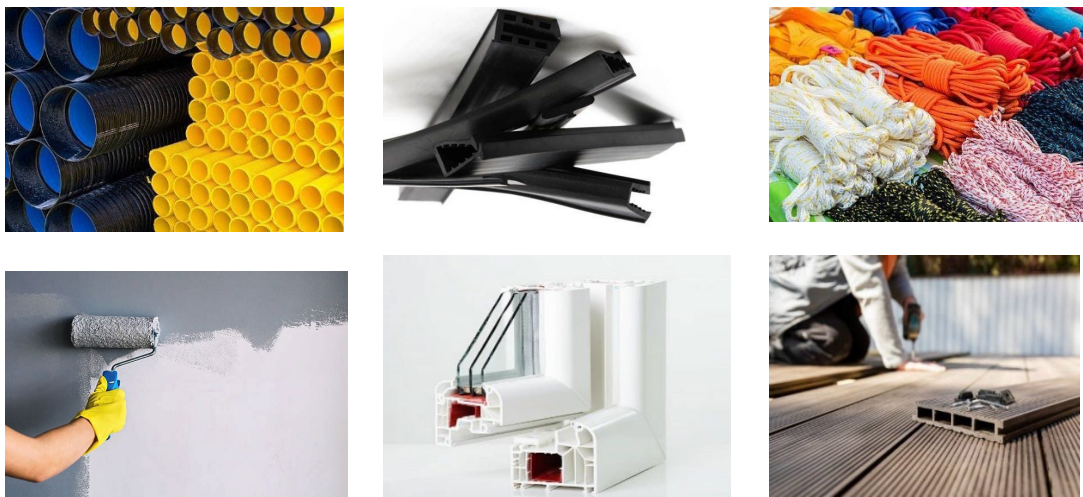


Figura 15: Materiales poliméricos (Poliamidas, PVC, Pinturas...). Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

- **Materiales compuestos:**

Pueden definirse de forma genérica como aquellos provenientes de la unión de dos o más materiales diferentes que, además de mantener las propiedades iniciales de los mismos, presentan un efecto sinergia que les permite tener una propiedad nueva, o bien potenciar una ya existente que no podría darse en sus componentes por separado. En estos materiales las fases deben ser químicamente distintas y separadas por una interfase.

Algunos ejemplos son los laminados, panel sándwich, materiales con matriz reforzada, etc.

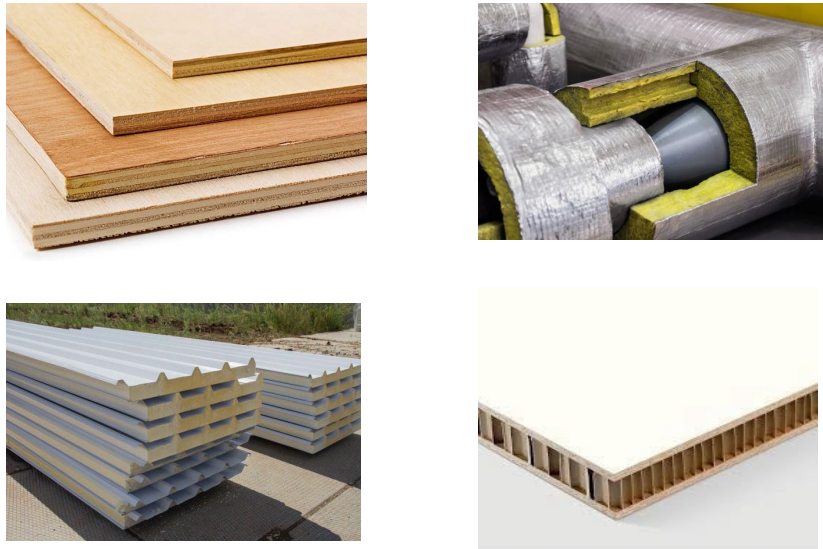


Figura 16: Materiales compuestos. Fuente: <https://www.istockphoto.com/>

1.2.2. Materiales ligantes.

En el oficio de la construcción existen materiales que ya están elaborados y así se suministran a obra. Otros, sin embargo, se encuentran como componentes sueltos que se emplean para unir, colocar o revestir al resto de componentes; a este grupo de materiales se les denominan **ligantes**, definidos en el apartado 1.2.1.

Con la aparición de los primeros homínidos, surge la necesidad de protección y refugio tanto de los elementos meteorológicos como del ataque de los animales. Para ello, se utilizaron los medios materiales disponibles a su alcance, como piedra, madera, barro, formando refugios o cabañas muy precarias. Con el tiempo, el material de unión, el barro, se sustituye por materiales basados en cal y yeso, dando paso posteriormente, al cemento y a los asfaltos. Todos estos materiales se sitúan dentro del grupo de materiales ligantes.

Se puede definir ligante como aquel material que, mediante una transformación física, química o físico-química, adquiere (después de un periodo de tiempo), solidez y resistencia, siendo capaz de unir entre sí a otros materiales. Dependiendo del tipo de transformación que se produzca, se pueden establecer dos grupos fundamentales de ligantes: los **conglomerantes** y los **aglomerantes**.

- ***Aglomerantes:***

Son materiales que, amasados con agua producen unión y cohesión de materiales fraccionados con una transformación exclusivamente física de consistencia plástica a sólida, son las arcillas y los betunes, se pueden clasificar en:

- Minerales: barros y arcillas.
- Hidrocarburos: derivados de petróleo, asfalto o el carbón (alquitrán).

- ***Conglomerantes:***

Engloba aquellos productos que, amasados con agua, fraguan y endurecen por procesos químicos o físico-químicos y son capaces de unir otros materiales adquiriendo el estado sólido, mientras que el segundo lo componen materiales que adquieren sus propiedades de unión, exclusivamente por procesos físicos como es el enfriamiento o la evaporación o secado. Por lo tanto, los conglomerantes son materiales que, al ser amasados con agua, se transforman mediante reacciones químicas en otros compuestos y se produce su endurecimiento [30]. El endurecimiento de un conglomerante es un proceso continuo, en el que la reacción que se produce va originando, de manera paulatina, un aumento de dureza y resistencia, pero se suelen distinguir dos etapas diferenciadas: la primera etapa sería el fraguado, que tiene un tiempo relativamente corto, durante el cual la masa formada por el conglomerante con el agua pasa de estado líquido a estado semisólido, para finalmente, adquirir consistencia sólida. Por otra parte, el endurecimiento, de duración más larga y durante el que la masa endurecida va adquiriendo de manera lenta resistencias mecánicas. A su vez, los conglomerantes se subdividen en dos grupos en función de sus características de fraguado: los conglomerantes aéreos y los conglomerantes hidráulicos.

Conglomerantes aéreos: Se trata de materiales en polvo que, amasados con agua endurecen en contacto con el aire. Dentro de este grupo se encuentran los **yesos, escayolas** y las **cales aéreas**.

Conglomerantes hidráulicos: Se trata de materiales que, amasados con agua, fraguan y endurecen tanto en el aire como bajo el agua. Dentro de este grupo se encuentran las **cales hidráulicas y los cementos**. El fundamento se basa en que, en contacto con el agua, se forman compuestos hidratados insolubles.

En función de su aplicación, los conglomerantes pueden utilizarse en forma de:

- Pasta: conjunto formado por el conglomerante más agua homogeneizados y amasados con consistencia líquida.
- Mortero: mezcla mediante amasado de un conglomerante, con arena o materiales inferiores a 4 mm y agua.
- Hormigones: material compuesto de la mezcla de cemento como conglomerante, arena y además materiales inertes gruesos, superiores a 4mm.

Las características que los conglomerantes aportan al producto final, son principalmente: plasticidad, moldeabilidad y resistencia.

1.2.3. El Yeso como material de construcción

El material empleado en esta investigación ha sido el yeso. Por ser un material muy utilizado en construcción y en rehabilitación; ya sea en forma pulverulenta, en sacos o como prefabricado.

Se emplea mayoritariamente en interiores como revestimiento o paneles prefabricados para particiones o placas para falsos techos.

Se estima que cada año se extraen más de 13 millones de toneladas de piedra de yeso según el informe presentado en la International Organizing Committee for World Mining Data 2022 [31] y que se muestra en la Figura 17. La huella de carbono que se genera desde su extracción es muy inferior a la de otros materiales ligantes.

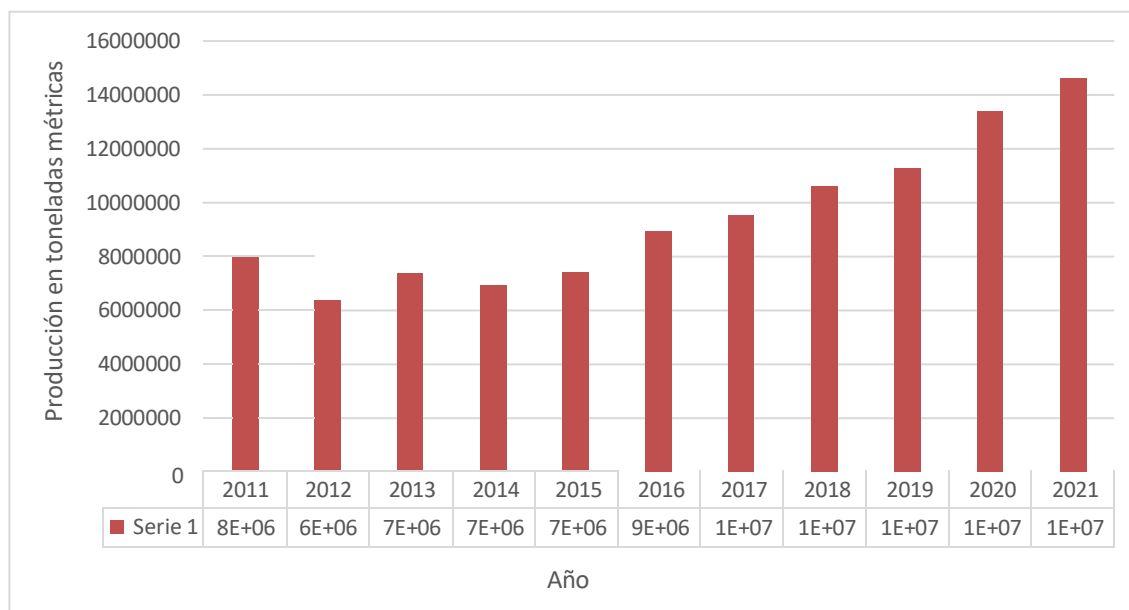


Figura 17: Evolución anual de la producción del yeso en España de 2011 a 2021 (en toneladas métricas). Fuente: Propia a partir de los datos recogidos de Statista 2023 generados a partir del Informe Internacional [31].

❖ **Antecedentes históricos**

El yeso es el conglomerante más antiguo utilizado tanto en la construcción, como en decoración, medicina e incluso, en la alimentación. “*Es uno de los materiales más usados y con más fuerte arraigo en nuestras tradiciones constructivas*” [32].

La piedra de yeso (aljez) es un mineral abundante en muchas zonas de la tierra y se descompone a temperaturas relativamente bajas, por lo que las primeras aplicaciones de este material se sitúan en el periodo Neolítico hacia el 12.000 a.C., donde los mesopotámicos lo utilizaban como revestimiento a sus recipientes de madera, y hacerlos resistentes al fuego. Desde el octavo milenio a.C se utilizó en construcciones de Oriente próximo para acabados superficiales y como base de decoraciones pictóricas [33]. En la civilización faraónica de Egipto, su uso fue abundante, sobre todo como base de paramentos que debían ser pintados, reduciendo la porosidad de la piedra base y obteniendo superficies lisas. También lo emplearon en la construcción de las pirámides, como mortero de juntas de los sillares.

Cuando los árabes conquistaron Mesopotamia y Persia, adoptaron las técnicas constructivas que empleaban yeso, considerándose maestros en la realización de yeserías difundiendo el arte del yeso por la Península Ibérica dejando, debido a su facilidad de labra y moldeado, maravillosas muestras ornamentales en ciudades como Granada, Málaga, Córdoba, Zaragoza, Toledo y Sevilla. Conjuntos arquitectónicos como la Alhambra de Granada constituyen un ejemplo de lo que se puede lograr con este material, no sólo por la riqueza y variedad de la ornamentación sin que, aprovecharon las ventajas que ofrece el yeso para la realización de moldes y vaciados y la prefabricación de los elementos ornamentales.

Después del gran incendio de 1666 que devastó por completo la ciudad de Londres, se observó que los pocos edificios que se mantuvieron en pie tenían revestimientos de yeso. Por este motivo, comenzó a utilizarse en Inglaterra realizando las primeras importaciones de este material a Francia, con la denominación “yeso de París”. Luis XIV, rey de Francia en aquella época, promulgó un decreto para el uso de yeso como material de construcción debido a su excelente comportamiento ante el fuego. Desde el siglo XVI, hasta finales del siglo XVIII, Lavoisier, Vant’Hoff y Le Chatelier, fueron estudiando el comportamiento de cocción del yeso abriendo el camino para posteriores investigaciones científicas [26].

❖ **Fabricación del yeso**

La obtención del yeso de construcción, sigue las siguientes etapas descritas por Luis de Villanueva en su “*Manual del Yeso*” [34]:

- **Extracción de la materia prima:**

El yeso, piedra de yeso o aljez, es una roca sedimentaria compuesta de sulfato de calcio con dos moléculas de agua o dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se forma en la cuenca de los ríos o lagos por precipitación de sales evaporíticas y se encuentra en la naturaleza en formas muy diversas. Posee baja solubilidad, con una densidad de $2,3 \text{ g/cm}^3$ aproximadamente, baja resistencia mecánica y una dureza al rayado de 2, en la escala de Mohs. Cuando el yeso queda enterrado a profundidad suficiente por acumulación de sedimentos o por movimientos tectónicos, se deshidrata y se transforma en anhidrita (CaSO_4) con distintas texturas.

La anhidrita puede volver a hidratarse y transformarse de nuevo en yeso. Los depósitos de yeso son abundantes en el mundo y en España la superficie total de afloramiento es de unos 21.700 km^2 . Los yacimientos geológicos yesíferos se encuentran principalmente en la

Cordillera Ibérica, Cataluña, Cuenca del Ebro, Cuenca Vasco-Cantábrica, Cuenca Tajo-manchea, cordilleras Béticas, Valencia y las Islas Baleares.

La actividad minera del yeso en España ha sido muy intensa alcanzando en 2006 una producción de 15,3 millones de toneladas. Después la producción cayó debido a la crisis de la construcción recuperándose lentamente hasta que, en 2019 se produjeron 11,3 millones de toneladas. Gran parte del yeso extraído de las canteras de España se destina a la exportación lo que ha convertido al país en uno de los principales exportadores de yeso del mundo procediendo, la mayoría de la cuenca de Sorbas (Almería). En la mayoría de los casos, la extracción se realiza en canteras a cielo abierto, suponiendo entre el 5-10% procedente de galerías excavadas. El yeso se extrae en grandes bloques para ser posteriormente troceado, antiguamente de manera tradicional con herramientas manuales como picos, palas, mazas y cuñas y, después con dinamita.

- Preparación de la materia prima:

Una vez extraída la materia prima de las canteras, se continua con el triturado hasta conseguir que la mayoría de los fragmentos estén en torno a 2-3 cm para su correcta cocción.

- Cocción:

La cocción del yeso se realizaba en hornos tradicionales situados junto a la cantera. Se disponían las piedras de yeso más densas y resistentes en las zonas bajas del horno en contacto con las llamas. La tipología de estos hornos es diversa, cilíndricos, rectangulares, cuadrados, pero siempre enclavados en un talud o desnivel que permitía su llenado por la zona superior y el vaciado por la zona inferior. El tipo de leña empleada dependía de la especie predominante en la zona pudiendo ser encina, chopo, pino o carbón vegetal. La duración de la cocción variaba entre 12 y 24 h. A finales del siglo XIX, el sistema de cocción tradicional evolucionó a hornos industriales de cocción uniforme que proporcionaban yesos más puros y blancos y la producción era mayor [35]. Sin embargo, se perdían las propiedades mecánicas y de durabilidad del yeso sin residuo [36].

Las moléculas de agua débilmente combinadas se van desprendiendo en forma de vapor, a medida que aumenta la temperatura, según se describe en la Tabla 1. Pudiéndose así obtener, diferentes productos, según el proceso utilizado.

El yeso cocido en forma de semihidrato, se emplea en construcción para guarnecidos, enlucidos, etc. y para prefabricados.

TEMPERATURA	DENOMINACIÓN	DESIGNACIÓN QUÍMICA
Ambiente	Aljez o piedra de yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
120°C a 180°C	Semihidrato (SH)	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
180°C a 300°C	Anhidrita soluble (AIII)	$\gamma\text{-CaSO}_4$
300°C a 700°C	Anhidrita II (AII) insoluble	$\beta\text{-CaSO}_4$
$\sim 1200^\circ\text{C}$	Anhidrita I (AI)	$\alpha\text{-CaSO}_4$
$\sim 1450^\circ\text{C}$	Fusión del yeso	

Tabla 1. Transformaciones del yeso con la temperatura. Fuente: Tesis doctoral Sanz Arauz.[37]

▪ Molienda y Almacenamiento en Silos:

A la salida del horno, el producto se muele en molinos de martillos o de bolas. Después se deja almacenado en silos, durante un tiempo, para homogeneizar el producto y finalmente se molerá hasta el tamaño deseado.

▪ Control de Calidad:

Para detectar los posibles fallos del producto o de su fabricación, se harán los controles o ensayos necesarios, a través de una empresa de control de calidad o por el fabricante.

▪ Almacenaje, envasado y expedición:

Para evitar la hidratación del yeso por la humedad ambiente, el almacenaje se realiza en silos metálicos, cerrados herméticamente. A continuación, el yeso es envasado y expedido en sacos de papel o a granel.

Según la norma UNE-EN 13279-1 [38] en España los tipos de yeso y conglomerantes a base de yeso se designan e identifican según se indica en la Tabla 2.

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso", por ejemplo: - para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos); - para su empleo directo en la obra: - para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado. en placas de escayola para techos).	A A1 A2 A3
Yeso para la construcción: - yeso de construcción: - mortero de yeso: - mortero de yeso y cal: - yeso de construcción aligerado: - mortero de yeso aligerado: - mortero de yeso y cal aligerado: - yeso de construcción de alta dureza:	B B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7
Yeso para aplicaciones especiales: - yeso para trabajos con staff. - yeso para morteros de agarre; - yeso acústico, - yeso con propiedades de aislamiento térmico: - yeso para protección contra el fuego, - yeso para su aplicación en capa fina, producto de acabado - producto de acabado	C C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7

Tabla 2: Tipos de conglomerantes de yeso según la norma UNE-EN 13279-1

❖ Fraguado del yeso

En función del tipo de yeso que se haya cocido, los productos que se formarán durante la rehidratación variarán. La teoría de Le Chatelier, es la admitida para explicar el proceso de fraguado del yeso. Según esta teoría, al amasar el semihidrato con agua se va produciendo alrededor de las partículas, una disolución sobresaturada de sulfato cálcico ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a partir de la cual precipita este dihidrato formando unos cristales que se entrecruzan [39] .

Dependiendo de las características que se busquen en el producto final del yeso, la relación w/y, pureza, finura de molido y cantidad de aditivos “*Material que se usa en una*

*cantidad muy pequeña para alterar una propiedad específica de otro material o, por el contrario para mejorar sus características” [40] ;será diferente. Siendo normalmente la relación agua/yeso 0,5 a 0,7 y en escayolas de 0,8-1. Mientras que la cantidad de los aditivos variarán según estudios realizados o consejos del fabricante. Cuando el tamaño de partículas retenidas en el tamiz de 200 μm sea $\leq 1\%$ o en el tamiz de 800 μm sea 0% y la pureza del material (contenido de aljez) sea del 90%, se considerará **escayola** en vez de **yeso** [41].*

Debido a los diferentes sistemas de fabricación y a los diferentes aditivos que mejoran y ajustan el producto a las exigencias del mercado, existen diferentes tipos de yesos para distintas aplicaciones como se describen en la tabla 2. No obstante, poseen unas propiedades comunes entre las que se pueden destacar:

- Es un material de densidad muy baja entre 0,8-1,2 kg/dm^3 . Muy ligero y no aconsejable utilizar a la intemperie, ya que con la humedad se reblandece. Fácil de trabajar, estético y de fácil aplicación.
- Conductividad térmica está entre valores comprendidos entre 0,43 $\text{Kcal}/\text{hm}^\circ\text{C}$ para los yesos de mayor densidad, hasta 0,3 $\text{Kcal}/\text{hm}^\circ\text{C}$ para los más ligeros.
- El yeso es un material buen aislante acústico. Absorbe el sonido y dificulta la transmisión del ruido de impacto y vibración. Haciendo con todo ello un material buen aislante acústico.
- Es un material de origen mineral, inorgánico e incombustible que puede servir, además como protector frente al fuego de otros materiales.
- El yeso es capaz de intercambiar humedad con el medio ambiente en el que se encuentre, guardando la humedad en sus poros y soltándolo poco a poco en los ambientes secos, haciendo que este factor sea muy importante en la habitabilidad de los edificios.
- Las resistencias mecánicas de los yesos varían en función del tipo de yeso, de los aditivos y adiciones que lleve. Pero en general se ha determinado según la norma UNE-EN 13279-2[22] que la resistencia a flexión es del orden de $1\text{N}/\text{mm}^2$ para los yesos de construcción (Tipo B) y la resistencia a compresión de $2\text{N}/\text{mm}^2$.

❖ **Aplicaciones**

Debido a las excelentes propiedades que presenta el yeso, es uno de los minerales más utilizados a nivel mundial en diferentes industrias: alimentaria, agrícola, química, farmacéutica...

Pero es en construcción donde desarrolla uno de los papeles fundamentales como material de revestimiento (enlucidos, guarnecidos), material de agarre o como prefabricado (paneles, bloques, placas de yeso laminado, placas para falsos techos, elementos de decoración...).

En revestimientos puede utilizarse como:

- **Guarnecido:** *“Revestimiento continuo realizado con pasta de yeso grueso que se aplica en interiores. Se ejecuta básicamente para regularizar el soporte y como base de un enlucido” [40].*
- **Enlucido:** *“Revestimiento continuo de pasta de yeso fino, cemento u otra mezcla de granulometría fina que se aplica sobre la capa de guarnecido o enfoscado con el fin de proporcionarle un acabado más liso”[42].*

Como material de agarre, el yeso se emplea en forma de pasta como ligante para unir otros materiales, o bien, es utilizado como material para recibidos.

En prefabricados puede utilizarse en forma de:

- **Paneles:** Elementos prefabricados de diferentes dimensiones y densidades para la construcción de tabiquerías en edificación a base de yeso, agua y aditivos correspondientes según las propiedades deseadas.
- **Bloques:** Los bloques son mezcla de arena, agua, yeso y en algunos casos fibras (para aumentar su resistencia) que debidamente mezclados, se vierten en moldes paralelepípedos obteniéndose, materiales para la construcción de paredes interiores de edificios.
- **Placas de yeso laminado:** son elementos prefabricados que constan de un núcleo de yeso que aporta rigidez y resistencia y dos capas de cartón que lo recubren por la parte exterior. Pudiendo tener acabados diferentes según las características que se quieran obtener como, por ejemplo: mayor resistencia al fuego, mayor resistencia

al agua. Utilizándose en tabiquerías interiores, paneles sándwich o trasdosado entre otros.

- Placas para falsos techos: Son prefabricados de yeso o escayola, agua y otras adiciones que mejoran sus propiedades. De forma rectangular o cuadrada generalmente de 1000 x 600 mm o 600 x 600 mm cuya cara vista puede ir decorada o no. En el dorso puede tener elementos metálicos incorporados en el proceso de fraguado que facilitan su colocación en obra para falsos techos continuos no desmontables. Por otro lado, también existen placas de techo desmontables con perfilera metálica vista, semivista u oculta.

Existe una gran variedad de elementos decorativos fabricados con escayola (yeso más fino y puro) que se colocan en techos o paredes a modo de decoración. La pasta es vertida en el molde, con la forma deseada y se deja enfriar, para posteriormente colocar en los encuentros entre pared y techo (cornisas), en los techos para realzar su belleza (molduras), alrededor de las lámparas a modo de decoración (rosetones), en algunos casos se utilizan columnas y pilares creando un aspecto elegante y clásico en interiores.

1.3. RECICLAJE Y RESIDUOS INDUSTRIALES

La humanidad ha vivido durante mucho tiempo, de espaldas a la naturaleza y sin preocuparse por los impactos que las distintas actividades industriales tenían sobre el medio ambiente. Se han consumido materias primas sin sentido de reposición, explotando la naturaleza y utilizándola como vertedero. A partir del último cuarto del siglo XX, como ya se ha comentado en el apartado 1.1, las diferentes instituciones y gobiernos comienzan a legislar y a tomar medidas para reducir los impactos e implantar políticas de control de consumo energético y gestión de los residuos generados.

Los factores sobre los que hay que incidir, para tratar de no seguir agravando la situación y en el mejor de los casos revertirla, entre otros son:

- Actuar contra el cambio climático, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero.
- Tratamiento de residuos, insistiendo en el reciclaje.
- Mejor aprovechamiento de las materias primas.
- Mejoramiento en la utilización y redistribución del agua.

- Mejoramiento de procesos industriales, haciéndolos menos contaminantes.
- Diseñar sistemas de reciclaje de los distintos tipos de residuos y exigir su cumplimiento.

Dentro del concepto de reciclaje, como un proceso en el que se reduce la cantidad de residuos por reutilización de estos, volviéndolos al proceso industrial como material, lleva a pasar de una economía lineal a una economía circular.

Cumpliendo la regla de las tres “R” que la Organización Ecológica a nivel mundial de Greenpeace [43] ha divulgado y que consiste en los tres conceptos básicos:

- Reducir: Producir bienes y servicios necesarios sin excesos, que produzcan menos residuos, menos consumo energético y menos gasto de materia prima.
- Reutilizar: Significa proporcionar una segunda vida a los objetos, bien directamente rehabilitándolos o buscando otro uso diferente en donde utilizarlo.
- Reciclar: Todas las actividades cotidianas producen contaminación en mayor o menor grado y generan residuos. Las operaciones de reciclado tratan de utilizarlos e incorporarlos a la economía circular o su uso como materia prima con el objeto de evitar que terminen en el vertedero.

La ley 7/2022 del 8 de abril [19] anteriormente citada, tiene por objeto asentar los principios de la economía circular a través de la legislación en materia de residuos, contribuyendo a los objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) incluidos en la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible aprobada por la Asamblea General de la ONU el 25 de Septiembre de 2015 [9].

Actualmente, es obligatorio a nivel nacional e internacional aplicar a los procesos industriales y a todas las actividades del ser humano una legislación que haga posible obtener los grados de sostenibilidad exigidos por la Agenda 2030 [44]. Por lo que todo uso y proceso que produzca residuos y gases de efecto invernadero, deberá de tener la obligación de reciclar los residuos y evitar la contaminación de agua y aire comentado en el apartado 1.1.1.

1.3.1. Reciclaje de los plásticos

Los residuos empleados para mezclar con el yeso en esta tesis son pelotas de pádel/tenis; que están fabricadas por caucho y nylon, dos plásticos de propiedades y composiciones diferentes que se describirán más adelante.

Los plásticos son uno de los materiales más utilizados en la vida cotidiana debido a sus buenas propiedades como material duradero, versátil, barato y con gran variedad de usos.

Su uso masivo produce una gran cantidad de residuos e incluso al degradarse, se convierte en micropartículas que terminan contaminando la tierra, el agua y que, a través de la ingesta de los animales, llega a la cadena alimenticia de los humanos. Por eso, es necesario establecer planes de gestión de los residuos.

El nombre genérico de plástico se emplea para un gran número de productos con composición y propiedades diferentes que hace complicado su tratamiento. Por este motivo, se deben ajustar los procesos de reciclado que implican una separación previa y clasificación por tipos y poder así establecer las posibilidades de reutilización de los residuos.

Se puede definir “plástico” como material sintético obtenido por polimerización de monómeros procedentes en su mayor parte del petróleo y en menor medida, de otros productos naturales (carbón, gas natural...) a los que se le añaden aditivos y cargas y que, en alguna fase de su fabricación, se han conformado por moldeo.

Los materiales plásticos, atendiendo a su respuesta térmica y su capacidad de deformación se pueden clasificar en tres grupos:

- Termoplásticos: Son polímeros que pueden fundirse y refundirse casi indefinidamente, pudiendo variar la forma por medio de la temperatura.
- Termoestables: Se trata de polímeros que sólo se puede estar en estado plástico una sola vez al ser calentados y cuando se enfrían, se obtiene una forma rígida, sin posibilidad de volverse a ablandar por efecto del calor ni variar su forma.
- Elastómeros: es un polímero altamente flexible que puede deformarse en gran medida al aplicarle una fuerza y recuperar la forma inicial, una vez retirada la fuerza. No se ablandan con el calor y no producen estado fundido, sino que directamente carbonizan.

El reciclaje de los plásticos será distinto en función del grupo al que pertenezcan. Los termoplásticos, obtenidos por un proceso de polimerización en cadena de monómeros, son lineales o débilmente ramificados, fáciles de reciclar y se pueden incorporar de nuevo al proceso de fabricación. Los termoestables, polimerizan mediante un mecanismo de condensación (liberando moléculas) por lo que no pueden volver al estado plástico con el aumento de temperatura. Una vez polimerizados, las cadenas se entrecruzan, ramifican y rigidizan dando configuración al sólido. Por lo tanto, los residuos se mecanizan y reutilizan en otros compuestos. Actualmente, se están realizando investigaciones que hagan posible su reciclaje y a un coste razonable.

Por último, los elastómeros están constituidos por cadenas de macromoléculas con configuración espacial y alta capacidad de deformación ante los esfuerzos. Forman resinas y gomas imposibles de reciclar. La única solución es triturarlos e incorporarlos a otros materiales con nuevas aplicaciones. La forma general de actuación es utilizarlos como materia prima para la combustión y producción de energía. A este grupo pertenece el caucho.

Atendiendo a sus propiedades y dificultad de reciclado, la Sociedad de la Industria de los Plásticos (SPI) agrupó, en 1988 los plásticos en 7 tipos, asignándoles la simbología que se muestra en la Figura 18 [45].

Los plásticos de los grupos 1-6 se pueden identificar con los termoplásticos, con mayores posibilidades de reciclaje, siendo los 1-2-4-6 los más recomendados para su uso.

Por otro lado, los grupos 3-5 son también termoplásticos, pero de mayor dificultad de reciclaje, obtenidos la mayoría por policondensación, siempre que sea posible se deben sustituir por los anteriores.

En el grupo 7 se encuentran los no reciclables, donde están los termoestables, elastómeros y poliamidas como el nylon. Grupo al que pertenecen los residuos procedentes de las pelotas de pádel/tenis empleados en el estudio de esta investigación, ya que el caucho es un elastómero y el fieltro que sirve de cubrición es nylon, una poliamida (PA). Para los cuales no existen planes de gestión de residuos y se hace necesario alguna estrategia de reutilización.

Por ello, uno de los objetivos de esta tesis consiste en estudiar el comportamiento de estos residuos mezclados con el yeso, evaluando el potencial físico y medioambiental de dicha incorporación.

Como norma general se ha establecido que todos los plásticos usados deben ir sellados con el símbolo del triángulo, en cuyo interior están las iniciales del tipo de plástico, con el fin de favorecer su selección para el reciclaje y marcar prioridad de utilización Figura 18.








SÍMBOLO	 PETE	 HDPE	 V	 LDPE	 PP	 PS	 OTROS
TIPO DE PLÁSTICO	Polietileno Tereftalato	Polietileno de alta densidad	Policloruro de Vinilo	Polietileno de baja densidad	Polipropileno	Poliestireno	Otros
PROPIEDADES	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes	Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, translucido, soporta solventes, versátil.	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.
USOS COMUNES	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.	Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empaquetar, envases para uso veterinario y farmacéutico.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos	Auto partes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.

Figura 18. Clasificación de los plásticos. Fuente: Propia con datos recogidos de SPG-Pack.

1.3.2. Características y reciclaje de las pelotas de pádel/tenis

El residuo utilizado en esta investigación que aparentemente, es inocuo, son las pelotas de pádel/tenis (P/T) una vez terminada su vida útil. Se fabrican con caucho natural vulcanizado y cubierto de fieltro. Se supone que en los primeros 400 años permanece su presencia simplemente algo degradada, pero siempre contaminando y además no es reutilizable, como sí lo son la mayor parte de los plásticos.

A pesar de no existir estadísticas sobre el número de personas que practican el pádel/tenis, se ha detectado un aumento de jugadores en los últimos años, especialmente en de pádel. Se fabrican unos 300 millones de pelotas de P/T anualmente a nivel mundial que originan unas 20.000 Tn de producto de caucho [2].

La práctica del tenis, según datos de la ITF (International Tennis Federation) en el informe Global Tennis Report [46], el aumento anual se mueve en el 4,5% de crecimiento, siendo el número de aficionados que lo practican de 87 millones en cualquiera de sus superficies en 200 países.

En cuanto al pádel y según informa la Federación Internacional de Pádel [47] hay más de 25 millones de jugadores activos repartidos en 110 países. En los últimos cinco años el interés por el pádel se ha triplicado. Existen tres circuitos profesionales y se celebran 55 torneos distribuidos en 24 países, lo que da una idea de la extensión y difusión que está alcanzando este deporte. Con estos datos, se puede deducir la problemática que supone la enorme cantidad de residuos que generan estas actividades deportivas. Hay que tener en cuenta que, en la obtención de 1 kg de caucho, se emiten 4kg de CO₂. Además, cerca del 90% del caucho se fabrica en China, por lo que hay que añadir el impacto asociado al transporte y distribución del producto al resto de países del mundo. Hay que tener en cuenta que, los residuos de las pelotas de pádel/tenis se producen, por un lado, durante la fabricación y, por otro, una vez finalizado su uso.

Por parte de algunas empresas y también de particulares, existen iniciativas y propuestas para abordar el problema de los residuos procedentes de las pelotas de tenis y pádel.

Por el contrario, no se conoce ninguna acción por parte de las Federaciones deportivas ni desde la administración en este sentido.

Algunas empresas tratan de colaborar para solucionar el problema. Por ejemplo, la empresa *Decathlon* recoge estos residuos para producir calzado tipo chanclas [48]. La empresa *Green Ball* los emplea para la valorización energética [49], incinera las bolas y aprovecha el poder calorífico del caucho como fuente de energía ayudando así a reducir el consumo de combustibles fósiles. Esta solución tiene como inconveniente alto grado de contaminación por el CO₂ que se produce en la combustión, mientras que la empresa *Ecomarb* [50] utiliza parte de estos residuos en la obtención de filamentos para uso en la impresión 3D. También son utilizados en zapatas para caballos por la empresa *Recycleballs* [51]. Otra empresa, *Winball* [52] recupera la presión que se pierde dentro del núcleo de caucho vulcanizado de las bolas por el uso habitual.

A nivel de residuo las pelotas de tenis y pádel se consideran iguales, pues sólo difieren en la presión del núcleo de aire y en unas mínimas características de dimensiones y peso tal y como se observa en la Tabla 3.

Características de pelotas P/T		
	Pádel	Tenis
Peso (g)	56 a 59,4	56,7 a 58,5
Presión (at).	1,75	1,81
Diámetro (mm)	6,35 a 6,77	6,35 a 6,67
Rebote (m)	1,35 a 1,45	1,43 a 1,47
Código Reciclado	7 (no reciclable)	7 (no reciclable)
Composición	caucho natural vulcanizado y cubierto de fieltro.	caucho natural vulcanizado y cubierto de fieltro.

Tabla 3: Características de las pelotas de pádel y tenis. Fuente: Propia

1.3.3. Residuos obtenidos en pelotas de pádel/tenis

En este subapartado se describen los residuos obtenidos en las pelotas de pádel/tenis y el proceso de fabricación de estas.

Los residuos pueden proceder de restos de fabricación o en el fin de la vida útil de la pelota.

- **Proceso de fabricación**

La fabricación de las pelotas de pádel/tenis comprende diferentes etapas, según describe Fj taiwan, nombre de la empresa dedicada a la fabricación de pelotas de pádel/tenis [53], que facilitó los residuo objeto de investigación.

1ª fase: El caucho natural es vulcanizado y mezclado con diferentes elementos químicos, amasándolo y laminándolo. (Figura 19)

2ª Fase: Se trocea la lámina en pequeñas piezas que se moldearán con la forma de la semiesfera de la pelota. (Figura 19) a una temperatura de 160°C.



A) Vulcanizado y mezcla del caucho

B) Moldeo de las semiesferas

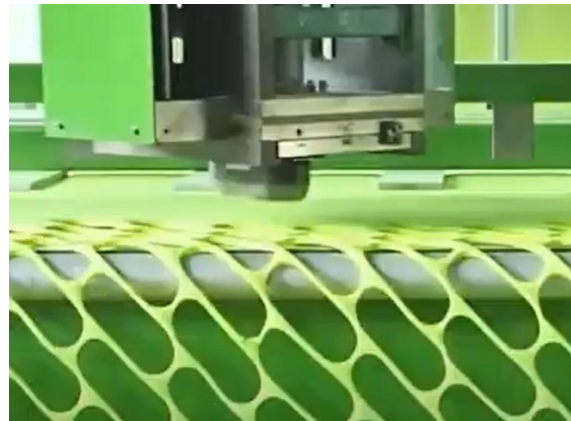
Figura 19: 1ª (A) y 2ª fase (B) de fabricación de las pelotas de pádel. Fuente: Fu-Jen.[53]

3ª Fase: Se lijan las partes esféricas y en el filo, se incorpora un adhesivo situándolas en la máquina correspondiente que las unirá y presurizará las semiesferas.

4ª Fase: Por otro lado, una troqueladora es la encargada de cortar las grandes láminas de fieltro (compuestas de nylon, algodón y lana) en forma de óvalos (material que recubre las pelotas). La formación y presurización de las pelotas, así como la troqueladora del fieltro se muestra en la Figura 20 .



A) Formación y presurización de las pelotas



B) Troqueladora del fieltro.

Figura 20: A) 3ª y B) 4ª fase de fabricación de las pelotas de pádel. Fuente: Fu-Jen.[53]

5ª Fase: Una vez obtenida la esfera de caucho, se recubre y adhiere con resina las piezas ovaladas de fieltro. (Figura 21).

Por último, el conjunto es prensado, para asegurar el pegado de las diferentes partes, así como de los materiales.



A) Recubrimiento de las pelotas



B) Último prensado del conjunto

Figura 21: 5ª fase de fabricación (A) de las pelotas de pádel (B). Fuente: Fu-Jen.[53]

En el proceso de fabricación de las pelotas de pádel/tenis existen dos tipos de residuos que son, los recortes de las láminas de caucho natural vulcanizado, Figura 22a) y lámina de fieltro, Figura 22 b). Por un lado, los residuos de fieltro son devueltos a la fábrica para su tratamiento y utilizados como materia prima. Por otro lado, en el caso del caucho natural vulcanizado, no se puede volver a utilizar, por tanto, se desecha o se buscan nuevas alternativas de utilización.



a) Residuos de caucho



b) Residuos de fieltro

Figura 22: Residuos producidos en la fabricación de las pelotas de P/T. Fuente: Fu-Jen [53]

El material que se utiliza para la formación de los nuevos compuestos del yeso, son las pelotas procedentes del pádel/tenis, donde el material fundamental es el caucho natural vulcanizado. Existen referencias del caucho en las crónicas sobre la conquista de México y también hay referencias, de 1520 sobre los juegos de pelota. La sustancia que exudaban algunas especies de árboles cuando se realizaban incisiones en la corteza, es un líquido blanco denominado látex. De esta sustancia se obtenía el denominado caucho natural. La especie de la que se obtenía el caucho de mayor calidad era el Hevea Brasilienses. Son especies arbóreas procedentes de Brasil y la cuenca del Amazonas. A finales del siglo XIX, con el desarrollo del comercio y las expediciones a América, se intentó traer semillas de este árbol a Europa. Sin embargo, esta especie no llegó a germinar con éxito.

Actualmente el 85% del caucho proviene del sudeste asiático (Indonesia, Filipinas, Malasia, Singapur...), del archipiélago malayo. Los principales productores de caucho natural se muestran en la tabla 4.

Productores de Caucho Natural	
Países	Cantidad (Tn)
Tailandia	4.744.250
Indonesia	3.630.268
Vietnam	1.137.725
India	978.317
China	824.000
Malasia	781.996
Costa de Marfil	461.000
Filipinas	423.371
Guatemala	349.546
Birmania	212.949
Brasil	199.870
Nigeria	145.450
Total	13.888.742

Tabla 4. Países productores del caucho. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de FAO "Food and Agriculture Organizations"[54]

A partir de que John Dunlop inventara los neumáticos y utilizara el caucho como material, el caucho pasó a cobrar importancia.

El látex se obtiene del tronco de la Hevea a través de unas incisiones en forma de "Y" conectadas a un recipiente que recoge el líquido entre los meses de Julio a Noviembre, en árboles con una edad superior a diez años, pues el máximo rendimiento de los árboles es entre los 13 y 17 años.

El látex contiene una media del 35% de caucho sólido, posteriormente pasa a un proceso de coagulación del caucho sólido y secado a 40-50°C y formación de láminas embaladas a presión dentro de grandes recintos para su exportación.

Al ser un producto natural que se obtiene en zonas muy limitadas, la variación del precio se altera por cualquier circunstancia, política, social y de demanda. La relativa constancia de calidad y búsqueda de propiedades mejorables llevó a investigar sobre el producto y eso llevó al descubrimiento de los cauchos sintéticos (derivados del petróleo).

Las propiedades del caucho natural no permiten su utilización ya que se trata de un material frágil. Por ello, se someten a un proceso de *vulcanizado* que consiste en tratarlos a temperatura alrededor de 140° y alta presión con azufre que se combina con las cadenas poliméricas del caucho. La proporción de azufre varía entre un 0,5-4% de forma habitual; aumentando su plasticidad y formando un elastómero termoestable. Aunque en algunos casos se llega hasta un 36% para obtener cauchos vulcanizados especiales.

La vulcanización se realiza sobre los cauchos naturales y algunos cauchos sintéticos. Los cauchos naturales en estado primitivo son un producto gomoso, inestable y pegajoso, con un punto de fusión de 120° C, relativamente bajo, y muy maleable, de difícil utilización, frágil a bajas temperaturas y que se deshace a altas temperaturas.

Una vez vulcanizado se convierte en un material de alta resistencia y gran estabilidad, mejorando el comportamiento para absorber impactos, pero oponiendo resistencia a la deformación.

En general a los cauchos que han sido vulcanizados, se les denomina, caucho sintético que engloba a todos los productos con las características del caucho Tabla 5. Entre las características más destacables del caucho vulcanizado destacan:

- Excelentes propiedades mecánicas: carga de rotura, alargamiento, abrasión, desgarro y desgaste por rozamiento.
- Alta resiliencia.
- Excelentes propiedades dinámicas, deslizamiento y de rebote.
- Estable en rangos de Tª -50°C a + 90°C.
- Buena resistencia a ácidos y bases, no a ácidos fuertes concentrados, como sulfúricos y clorhídricos.
- No resiste al contacto con aceites, grasas, benceno.
- Excelentes propiedades eléctricas.
- Facilidad de pegado y adherencia con tejidos y otros materiales.
- Inestable al ozono y buena resistencia al agua.

NOMBRE	C.QUÍMICA	DENSIDAD (gr/cm ³)	MÓDULO ELÁSTICO (GPa)	COEF. POISSON	R.COMPRESIÓN (MPa)	R.TRACCIÓN (MPa)
Isopreno Metilbutadieno	$(-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$	0,92 a 0,93	0,0015-0,0025	0,49 a 0,5	22 a 23	22 a 32

Tabla 5. Propiedades del caucho. Fuente: Propia de los datos recogidos en <https://www.quimica.es/enciclopedia/Caucho.html>

En la industria, se emplea la denominación de caucho para diferentes productos: caucho natural; caucho natural vulcanizado (llamados sintéticos, pero que no proceden del petróleo) y caucho sintético (los derivados del petróleo).

Para hacer frente a las diferentes necesidades de la industria aparecen diferentes productos de caucho sintético con las características básicas del caucho natural y otras nuevas o mejoradas. Dando lugar a los cauchos sintéticos, obtenidos a partir del petróleo.

Los cauchos sintéticos aprovechan las magníficas propiedades del caucho natural y mejoran fundamentalmente su estabilidad a los hidrocarburos, mayor resistencia a la luz, al ozono, a los aceites. Mejorando la resistencia a productos orgánicos y el calor, menor envejecimiento, uniformidad de composición y el poder obtenerlos en cualquier lugar del mundo, no limitándonos a los mercados o países inestables.

A partir de la década de 1930 en Alemania aparecieron los primeros plásticos sintéticos Buna (S) y Buna (N) derivados del butadieno C₄H₆, procedentes del petróleo, el Buna S conocido como SBR, es un poliestireno butadieno (estireno), con el que prácticamente el 60% se utiliza en la fabricación de neumáticos. Con una combinación de un 19% CN (caucho natural) y un 25% SBR, el resto metales y otros materiales. Por otro lado, el Buna N, también llamado NBR, son elastómeros de nitrilo de los más utilizados por su resistencia a los combustibles.

Dentro de la industria, el SBR supone más del 40% del total de los cauchos naturales y sintéticos. Siendo la producción del caucho natural de 14,2 millones de Tn y 15,5 millones de Tn el sintético durante el año 2022.

Y se espera una subida anual del 4,5% como en los últimos años (Según Statista 2023).

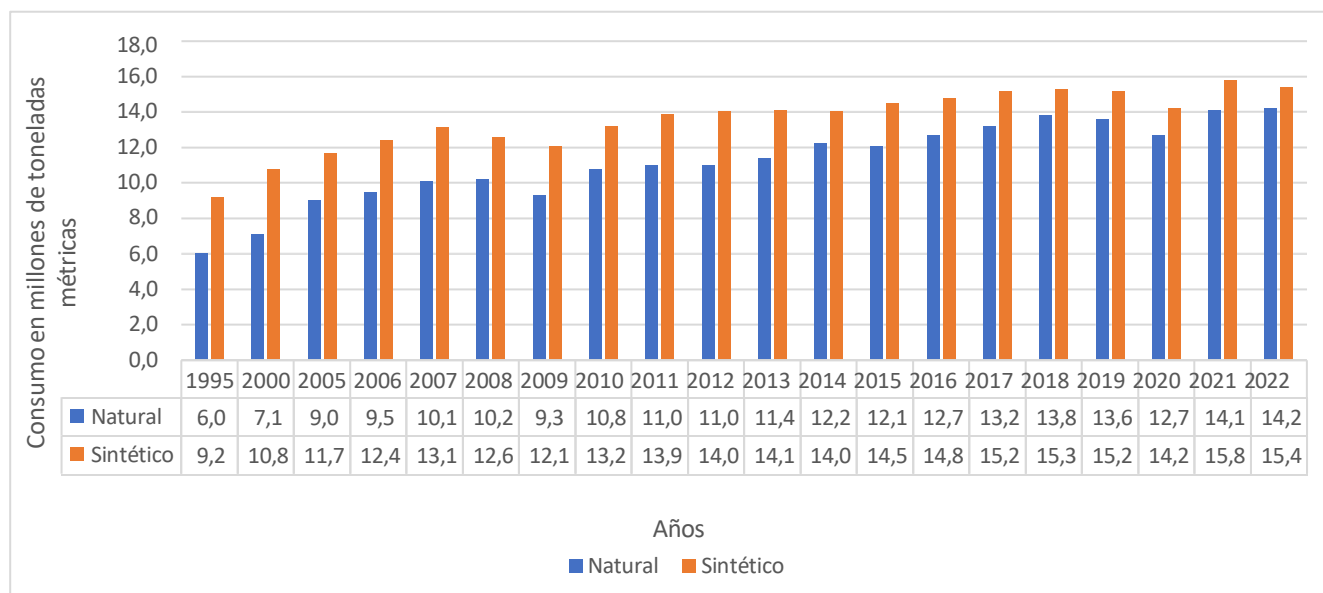


Figura 23. Consumo de caucho natural y sintético a nivel mundial (1990-2022). Fuente: Propia según los datos del Statista.[55]

Las propiedades de los cauchos sintéticos son similares a las del CN ajustadas a los usos, debido a que obedecen a distintas formulaciones. Eliminando, al ser fabricadas, la falta de uniformidad del CN, así como su poca estabilidad frente algunos aceites, mejorando la resistencia al ozono y al aire, aunque disminuyan algunas propiedades mecánicas, y de uso; como el deslizamiento y el rebote.

De forma breve los cauchos sintéticos más utilizados comercialmente, se pueden ordenar según el consumo en:

- Estireno butadieno (SBR): El más importante de los CS y el primero que surge para sustituir al CN. Una vez vulcanizado, se hace insoluble en solventes hidrocarbonados, representa el 60% de los cauchos. Su mayor utilización es en la industria del automóvil sobre todo en la fabricación de neumáticos juntos con el CN.
- Polibutadieno (BR): El polibutadieno, tiene gran flexibilidad, incluso a baja temperatura, resistencia a la abrasión excelente y al desgarrar, se suele utilizar junto a otros cauchos, sobre todo para la industria de los neumáticos.

- Butilo (IIR): Es un copolímero del isobutadieno e isopropeno, no puede mezclarse con el CN. Es sensible al calor y a la compresión, resistentes a agentes químicos y a la permeabilidad del aire. Muy útil en cámaras de aire de neumáticos.
- Polietileno propileno dieno (EPDM): Copolímero del etileno y propileno. Con gran resistencia a la luz solar y al ozono, con excelentes propiedades eléctricas, para revestimientos de cables, burletes, recubrimientos de tejados, zanjas, vertederos.
- Neopreno (NBR): Policloropropeno, que tiene características que no tiene el CN, es especialmente resistente al aceite, la luz solar, el ozono y gran resistencia al calor y a la oxidación. Es autoextingible, necesita el vulcanizado, no se puede hacer caucho duro. En sus aplicaciones está los casos que necesitan las características del caucho pero que deben estar en contacto con aceites, hidrocarburos como mangueras de combustibles, bandas y planchas de apoyo.
- Cauchos Fluorado (CFM-FKM): Copolímeros y terpolímeros con base de fluoruro de vinilideno y hexfluorpropileno. Son de los elastómeros más caros y de mejores características.
Con excelentes resistencias a ácidos, bases de hidrocarburos alifáticos, aceites, ozono, amplio rango de t^a bajas de trabajo, no apropiado para aminas, acetonas y vapor, es autoextinguible. Se utiliza en pinturas, piezas en rollos, planchas.
- Siliconas (MQ): Caucho totalmente distinto del resto, no tiene presencia de caucho, es un polímero de base Si, cadena alternada de Si y O₂. Son de alto coste. Tienen un mercado muy amplio, debido a características como las de cualquier caucho, pero mejoradas en cuanto a su estabilidad térmica, aislamiento eléctrico, repelen el agua. Tienen aplicaciones donde sus propiedades sean exigibles a pesar del coste, como pegamentos, juntas, sellados, aislamientos eléctricos, toda clase de productos moldeados o extruidos.

El mundo del caucho sintético está basado en la composición del CN, conservando las propiedades de este y mejorando otras.

El otro componente de las pelotas de pádel/tenis es el recubrimiento de fieltro. Se trata de tejido a base de fibras de *Poliamidas*; un polímero que contiene enlaces del tipo amina. Es un termoplástico que puede encontrarse en la naturaleza, en la lana, el algodón, la seda o de forma sintética; que se obtiene a partir de la hexametildiamina y ácido adípico dando lugar al nylon 6,6 cuya fórmula es $(-NH(CH_2)_6NHCO(CH_2)_4CO-)$.

Las características generales del grupo de las poliamidas y que les hacen ser uno de los plásticos más utilizados son:

- Buena resistencia mecánica, sobre todo a tracción.
- Durabilidad y resistencia a la degradación ambiental.
- Facilidad de adherencia y coloración.
- Resistencia al rozamiento
- Recuperación elástica a la deformación y flexibilidad.
- Tacto suave y confortable.

El recubrimiento de fieltro proporciona una terminación óptima a las pelotas de P/T ya que les confiere propiedades tales como rebote controlado, elasticidad (deformación recuperable instantánea), rozamiento, tacto suave y durabilidad.

Las poliamidas se utilizan en muchas industrias como por ejemplo en el sector eléctrico, para mecanismos eléctricos e interruptores. En la industria del automóvil se emplean para ruedas, dispositivos y elementos de fijación. En la industria del deporte se pueden encontrar en utensilios de pesca, navegación, tenis. Por otro lado, también son ampliamente utilizadas en la industria de la construcción, para confección de sacos, tensores, cuerdas, etc. En la industria aeroespacial se emplean para determinadas zonas del fuselaje de aviones y naves espaciales. Por último, cabe destacar la utilización en la industria textil, que confecciona trajes, paracaídas, ropa deportiva, etc.

La producción de poliamidas implica consecuencias negativas sobre el medio ambiente; se consume gran cantidad de agua y energía, se liberan monóxido (NO) y dióxido de nitrógeno (N₂O), gases que contribuyen al efecto invernadero.

Es necesario recuperar la mayor parte de nylon residual para incorporarlos a la industria y reducir la utilización de recursos y minimizar la contaminación.

Se pueden diferenciar dos métodos de reciclaje de las poliamidas:

- a. Mecánicamente: Se separa, limpia y vuelve a fundirse; ya que se trata de un termoplástico, y después, se vuelve a dar forma.
- b. Químicamente: Una vez limpia, se polimeriza hasta el monómero base, después se re-polimeriza mediante aditivos químicos, y se vuelve a procesar.

Las poliamidas recicladas no pierden las propiedades iniciales y también tienen la gran ventaja de la facilidad para proporcionarles nuevas formas. No obstante el sistema de reciclaje es aún difícil y costoso [56].

- **Final de la vida útil del producto**

Una vez fabricada la pelota de pádel/tenis el objetivo ideal sería que su duración fuera de muy largo plazo. No obstante, la presión en el interior de las pelotas, que oscila en torno a 1,8 atm. como valor de referencia, va disminuyendo una vez abierto el recipiente de plástico en el que están almacenadas y que también está presurizado. A medida que las pelotas se van utilizando durante la práctica del deporte se pierde aún más presión, disminuye la capacidad de rebote y la respuesta al golpeo es menor.

Lo que supone originar una gran cantidad de residuos de este material, pues prácticamente los profesionales por partido de 2 sets utilizan de 3 a 6 botes de tres pelotas cada uno, y los aficionados un bote de tres pelotas cada tres partidos. Desde el año 2012, se ha producido un continuo crecimiento de la práctica de los deportes tenis y pádel según informa el Anuario de Estadística Deportiva del Ministerio de Cultura y Deporte en 2023 [57] y se puede comprobar con los datos que representa el gráfico de la Figura 24. Produciendo como se ha mencionado anteriormente unas 20.000Tn de residuo anual a nivel mundial.

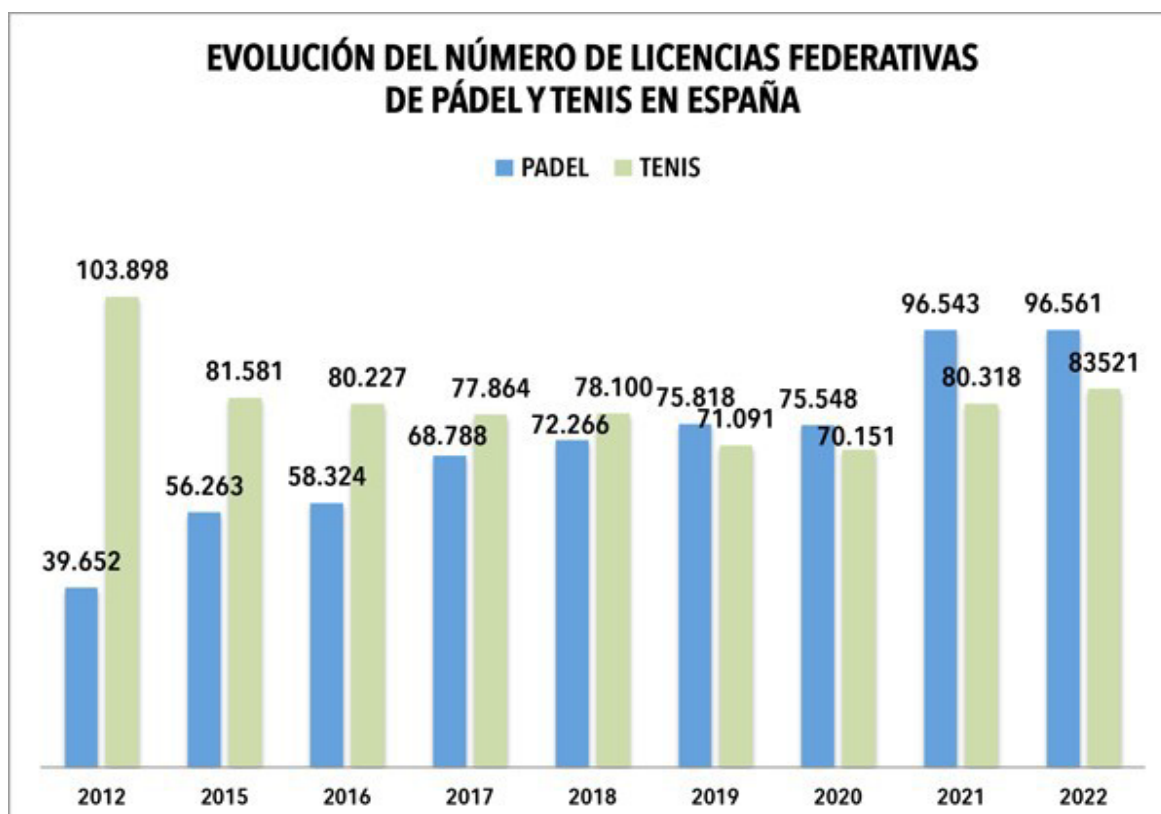


Figura 24. Licencias federativas del pádel y tenis. Fuente: El Anuario de Estadística Deportiva 2023 del Ministerio de Cultura y Deporte [38].

1.4. CONSIDERACIONES PARCIALES

Se entiende por impacto ambiental a toda alteración del medio ambiente, efectuado de forma directa o indirecta por el ser humano.

La huella medioambiental de los edificios es muy elevada. El 40 % de los materiales que se extraen en España se utilizan en construcción. El alto consumo de energía que se produce en edificación es otro de los factores que más afecta al impacto medioambiental, ya que los procedimientos de extracción, el transporte, maquinaria etc. generan gases contaminantes en el aire. Además, toda actividad de construcción origina una serie de desechos líquidos y sólidos en muchos de los casos de difícil eliminación.

Desde hace varios años, se está intentando hacer realidad una arquitectura sostenible, que reutilice materiales, que mejore la eficiencia energética y emplee menos recursos naturales.

El yeso es un mineral muy utilizado en construcción y que la cocción de la piedra de para su fabricación, se emiten grandes cantidades de CO₂ al medio ambiente, siendo este uno de los gases que más interviene en el calentamiento global (efecto invernadero).

Por ello, existen numerosas investigaciones de nuevos compuestos a base de yeso y diferentes residuos utilizables en construcción, para encontrar nuevos materiales que ayuden a utilizar menos recursos naturales y se integren en el ciclo de vida y reduzcan las emisiones de CO₂.

Una vez que las pelotas de pádel/tenis han perdido presión y las propiedades que les hacen aptas para la práctica de estos deportes, se convierten en residuos cuyo destino final es el vertedero. Un pequeño porcentaje, inferior al 10%, tienen una segunda utilización, pero se producen 25 millones de pelotas pádel/tenis al año a nivel mundial como residuo contaminante. Si se tiene en cuenta que la materia prima principal es el caucho natural vulcanizado, que no se puede reutilizar como materia prima inicial, hace necesario darle otra salida.

En esta investigación se propone utilizar yeso/escayola y mezclarla con los residuos procedentes de la fabricación de las pelotas y de los generados en la trituración de estas para obtener un material compuesto que pueda aplicarse en unidades de obra de forma similar a los prefabricados de yeso/escayola.

**ESTADO DEL ARTE
SOBRE COMPUESTOS
DE YESO CON
ADICIONES.
CAPÍTULO 02.**

CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen los estudios seleccionados de la bibliografía en los que se ha empleado el yeso como material base, y se ha mezclado con diferentes residuos con el objeto de obtener nuevos productos, gestionar el reciclaje y contribuir con la economía circular. Así como las investigaciones que han incorporado en sus trabajos la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Con el objetivo de evaluar el beneficio medioambiental alcanzado con el desarrollo de nuevos materiales y productos eco-eficientes para edificación.

Al final del apartado se establecen las principales conclusiones derivadas de la revisión bibliográfica.

Se establecen los siguientes apartados:

- 2.1 Compuestos de yesos con adiciones.
- 2.2 Análisis de ciclo de vida en compuestos de yeso.
- 2.3 Consideraciones parciales.

2.1. COMPUESTO DE YESO CON ADICIONES.

Como punto de partida para el desarrollo de esta tesis, se consultaron diferentes investigaciones que incorporaron al yeso residuos similares a los de esta investigación (caucho y fibras):

Por un lado, el **caucho**, destacando el estudio realizado por Jiménez Rivero, A. et al. [58] donde resaltan que, cuanto mayor es el porcentaje y el tamaño de *caucho (procedente de coquillas aislantes)*, la dureza SHORE C, la densidad y las resistencias mecánicas disminuyen considerablemente debido a la formación de microporos en la matriz.

Herrero, S. et al. [59] investigan el comportamiento de las mezclas de yeso con un 50%,60% de *caucho* (residuo de neumáticos utilizados) observando una disminución de resistencias a flexión y compresión; ajustándose los valores a una curva que sigue una ley, permitiendo predecir el comportamiento mecánico en función del porcentaje de caucho utilizado. La adición de este material, en un 30%-40% mejora la densidad, resistencia mecánica y sobre todo el comportamiento acústico y térmico.

Al igual que sus compañeros, Serna, S. et al. [60] utilizan residuos de *caucho* de los neumáticos en sus artículos resultando que la mezcla de yeso con caucho disminuyen en un 16% la resistencia a flexión y un 18,3% la resistencia a compresión, aunque cumplen con las exigencias mínimas exigidas. Además, también disminuye la dureza superficial del yeso y le da una tonalidad de color oscuro.

Son los científicos del equipo de Lozano-Díez, J. et. al [61] en diferentes investigaciones durante los años 2016-2019, quienes estudian el comportamiento de la mezcla yeso/*caucho* según la dosificación y granulometría en placas de yeso. Afirmando que, a mayor cantidad y tamaño de caucho, menor es la trabajabilidad y homogeneidad del compuesto. La densidad disminuye en todos los compuestos estudiados siendo así yesos aligerados. Se obtiene un material compuesto mejorando las propiedades térmicas y acústicas, así como la tenacidad. En cambio, la resistencia a flexión y compresión se ven disminuidas.

Por otro lado, son objeto de estudio las mezclas de yeso con diferentes *fibras* como lo hacen: Jia R. et al. [62] escribiendo un artículo en el que revisan y recopilan las investigaciones sobre compuestos a base de yeso que utilizan fibras para mejorar el rendimiento de los compuestos de yeso sin adiciones. Resumen y analizan las propiedades del yeso y de las fibras y los tratamientos de las fibras para mejorar su adhesión con la matriz.

Esta revisión proporciona una base y una guía para futuros estudios y usos de los compuestos de yeso reforzados con fibras.

Cabe destacar la investigación de Gutiérrez-González, S. et. al [63] donde se estudian diferentes relaciones en peso de yeso y residuos. Obteniendo los mejores resultados para la utilización de la mezcla en revoques, cuando se utiliza una relación de *Yeso/Poliamida* de 0,5. Debido a que, con relaciones mayores, se detiene mucho el fraguado del yeso, así como la viscosidad y trabajabilidad de este.

García Santos, A. [64] utilizando *fibras de polipropileno* observa que las características mecánicas del yeso mediante la adición de fibras y dispersiones poliméricas, dependen de la forma de probeta como de la adición. Obteniendo mejores resultados con las placas, que con las probetas prismáticas y utilizando la mezcla de ambas adiciones.

Oliver Ramírez, A. (2011) estudia el comportamiento de materiales de cambio de fase. Obteniendo placas compuestas de *melamina formaldehído y fibras de polipropileno* que llegan a mantener mucha más energía térmica a igualdad de espesores que una lámina de yeso sin residuo.

En su investigación Gencil, O. [65] incorpora *fibras de polipropileno y vermiculita* en el yeso. Averiguando que las fibras hacen que las propiedades físicas y mecánicas mejoren, respecto al comportamiento del yeso sólo, así como las propiedades térmicas mejoran debido a la vermiculita.

Gencil, O. et al. [66] analizan que con el aumento de contenido de *diatomita* hace que el coeficiente de conductividad térmica disminuya. Haciendo que el material yeso-diatomita sea mejor en cuanto a aislamiento térmico. Con esta adición también aumenta la resistencia a compresión, siendo indiferente la resistencia a flexión. En cambio, cuando se mezcla *con fibras de polipropileno* el yeso, la resistencia a flexión y a tracción mejoran notablemente.

Zhu, C. et al. [67], Investigan que con el aumento de % y longitud de las *fibras* la trabajabilidad del yeso aumentaba su dificultad. La tenacidad y la resistencia a flexión de los compuestos fueron mejores que las del yeso sin residuo. Obteniendo mejores resultados con las fibras de PVA que con las del PP.

Suárez Guerra, S. et al. [68] investigaron que la adición de *fibras de propileno y poliolefina* en una matriz de yeso, aumenta la energía de fractura del mismo, siendo mayor en el de las de polipropileno. Además, la de poliolefina lo hace en una fractura principal y varias secundarias, mientras que las de polipropileno tan sólo en una principal.

Las fibras de lana mineral que emplean para su investigación Romaniega Piñeiro, S. et al.[69]. Se encontró una buena compatibilidad entre los residuos de lana mineral utilizados en la construcción y la matriz de yeso. La dureza Shore alcanza su máximo cuando se le añade el 4% de residuo mineral. Aumentando la resistencia a flexión en un 34,88% respecto a la muestra sin adición y un 26,56% la resistencia a compresión.

Kugo, A. et al. [70], incorpora *fibras de madera de pino silvestre y posidonia marina* produciéndose un aumento de porosidad en la mezcla provocando una disminución mecánica. Las fibras de origen marino aumentaron la ductilidad del yeso. Comprobando además que el efecto en las propiedades depende de la cantidad de fibras y no de la longitud de estas.

Lucolano, F. et al.[71] utiliza las *fibras de cáñamo y resina epoxi* . Verificando que la mezcla de yeso con fibras de cáñamo-epoxi, presentaron mejor adherencia con el yeso que las fibras de cáñamo sin imprimación. Estas fibras mejoran la resistencia a flexión y a impacto llegando, incluso a evitar la formación de grietas.

Suresh Babu, K. et al.[72] en su investigación, también demuestra que, añadiendo residuos de *fibras de cáñamo* , se mejoran las resistencias mecánicas, las propiedades de aislamiento térmico y el porcentaje de absorción de agua.

Caña de azúcar y paja de trigo son los residuos utilizados por Nazerian, M. [73] en los conglomerados de yeso. Observando que la absorción de agua mejora disminuyendo cuando el contenido de residuos es mayor. De modo que, para que los valores de resistencias mecánicas cumplan con lo establecido en la norma, fijan el contenido de residuos en un máximo del 12,5%.

Tasán Cruz, et al. [74] utilizan *eslingas textiles* afirmando que cuanto más alto es el porcentaje de fibras, la resistencia a flexotracción aumenta. La densidad y la dureza Shore descienden, posiblemente debido a las burbujas de aire que pueden formarse entre dichas fibra.

Otros autores buscan mejoras en acondicionamiento acústico y resistencia al fuego con diferentes adición, como es el caso de Vijaykumar, G. et al. [75]. Utilizan *fibras de coco y lana* mezcladas con yeso. Obteniendo muy buenos resultados en cuanto a la mejora de la resistencia al agua, aislamiento acústico y resistencia al fuego.

Son numerosos los residuos incorporados en los compuestos de yeso, procedentes de diferentes ámbitos, con el objetivo de encontrar materiales más sostenibles, entre los que podemos resaltar:

Alcón Calla, S. et.al [76] y Ramos, F.et al. [77] en cuyas respectivas investigaciones el residuo de botellas de plástico en la matriz de yeso observaron que se comporta muy bien como impermeabilizante , cumple las exigencias mínimas establecidas por la Norma en cuanto a resistencias mecánicas y valores de inicio y final de fraguado.

Vidales Barriguete, A. [78] mezcla el yeso y la escayola con *residuos plásticos procedentes de cables*, obteniendo los siguientes resultados: con un % menor del 70%, debido a que en mayor cantidad se inicia y finaliza el fraguado, un compuesto de mejor resistencia mecánica, densidad y dureza superficial en la mezcla de escayola-cable. Los compuestos con residuos plásticos en general se comportan mejor frente al fuego, a la acción del agua y un mejor acabado superficial.

San-Antonio-González, A. et al. [79] demuestra que independientemente de la cantidad de adición de XPS, el tiempo de fraguado y la trabajabilidad de la mezcla se ven afectadas. Se aumenta la cantidad de XPS de manera progresiva y se va reduciendo la densidad hasta un máx. de un 30% más o menos, haciendo que el comportamiento de conductividad térmica sea bueno. Al mismo tiempo a mayor, cantidad de residuo, la rugosidad de superficial es mayor, afectando de este modo a la dureza Shore. Por otro lado, con grandes cantidades de XPS la resistencia a flexión disminuye hasta un 58% y la de compresión en un 74%, no cumpliendo con las exigencias mínimas establecidas en la norma.

Debido a la porosidad que genera la adición de las *partículas de poliestireno*, la conductividad térmica disminuyó, mejorando las propiedades de aislamiento, frente a los yesos ordinarios. En cuanto a la absorción de agua, se observó que estaba por encima del 30%, por tanto, su uso se aconseja sólo en interiores. Resultado al que llegó en su investigación Ayse Bicer, F. [80].

De Oliveira, K. et al. [81] llega a la conclusión de que con los aditivos de *poliestireno y celulosa* se obtiene un material de baja densidad que cumple con las resistencias mecánicas mínimas exigidas a los yesos ligeros. Y la capacidad de aislamiento térmico es mejor en los yesos con aditivos que sin ellos.

Otros de los investigadores, Bouzit, S. et al [82] en la actualidad también estudia el comportamiento del yeso con las *bolas de poliestireno* resultando rendimientos mecánicos bajos, tanto a flexión, como a compresión. En cambio, se obtienen propiedades térmicas y acústicas mejores, que con el yeso puro.

Chuanbei, L. et. al [67] investigan que dependiendo de la adición del *polisacárido* que se utilice en la mezcla es mejor para un determinado tipo de trabajo u otro. Pero con ambas adiciones se comprueba que de una manera u otra se mejora la plasticidad y las propiedades reológicas del yeso.

De las investigaciones realizadas sobre compuestos de yeso con algún tipo de polímero, destaca Wenxiang C. et. al [83] que emplearon *superplastificante* como adición del yeso. Se comprueba que se retarda la hidratación de la pasta y, por tanto, el tiempo de fraguado. Se observa una mejora general en las propiedades físicas y químicas.

Hernández-Olivares, F. [84] analiza el comportamiento del *yeso-corcho*. Comprobando que las propiedades de aislamiento térmico mejoran y, en cuanto al aislamiento acústico se comporta más como un material reflectante del sonido que fonoabsorbente.

Del Río Merino, M.[85] utiliza residuos de *corcho bornizo* obteniendo con la mezcla , compuestos cuyas resistencias mecánicas son mayores que los valores indicados en la normativa, pero inferiores a los obtenidos con el yeso sin adiciones.

Cherki, A et al. [86] afirma que, con la mezcla de *yeso - corcho* se disminuye notablemente la conductividad térmica, resultando por tanto, un material de alto grado de aislamiento.

Morales-Conde M.J. et al. [87], utilizaron *virutas de madera y serrín* observando que la madera reciclada, dificulta la trabajabilidad de la mezcla por lo que hace necesario modificar la relación agua/yeso. Además, la dureza superficial y las resistencias mecánicas disminuyen a medida que se añaden virutas de madera. En cuanto al aislamiento acústico y térmico, se observa que mejora con la mezcla de yeso y el material procedente del reciclado de la madera.

Marte Rosario, M. [88] incorpora al yeso residuo de *cáscara de nuez*. Los resultados más relevantes obtenidos apuntan que la resistencia a flexión y a compresión disminuyen a mayor porcentaje de cáscara añadida. La dureza superficial del material mixto se asemeja a la del yeso cuando la granulometría del residuo es de 4mm.

Leiva Aguilera, MJ. [89] incorpora *cáscara de arroz* a la matriz de yeso resultando que las resistencias mecánicas del material disminuyen. Sin embargo, la dureza y tenacidad aumentan considerablemente, al igual que mejora el comportamiento a la absorción del agua.

Mohd Ezwan, S.et. al [90] también emplea *cáscara de arroz* y, además, *residuo de palma aceitera* como mezcla con el yeso. El resultado muestra que, añadiendo cáscara de arroz disminuyen los tiempos de inicio y fin de fraguado del yeso siendo inferiores que cuando se añade residuo de palma aceitera. Por el contrario, las propiedades mecánicas conseguidas con el residuo de palma fueron mucho mayores que las obtenidas con la cáscara de arroz. Ambos residuos mejoraron el comportamiento ante el fuego.

Por otro lado, Sophia, M. et al. [91] mezclan yeso con *cáscara de huevo*. Cumpliéndose que la mezcla del yeso con polvo de cáscara mejora la trabajabilidad del yeso. Resultando además buenas resistencias mecánicas y térmicas.

Otros estudios como el de Brahim, I. et. al [92] introducen *paja y aditivos naturales* (hemoglobina de cerdo, caseína y gelatina), tratando de buscar un material con propiedades aislantes. Las resistencias mecánicas obtenidas fueron muy bajas. No obstante, la conductividad térmica disminuyó con la aportación de los residuos por lo que el material es apto como aislamiento térmico.

Arvelo Reynoso, E. [93] utiliza residuos procedentes de *plumas de pollo* en su investigación resultando una bajada en la densidad de la mezcla, pudiéndolas utilizar como material aligerante. Estas aumentan la tenacidad del yeso, así como su trabajabilidad y absorción.

Además; Tayibi, H. [94], empleó *polvo de aluminio*, procedente de la fusión de chatarras. Obteniendo mejores características mecánicas y dureza Brinell con la incorporación de dicho residuo.

Con la incorporación de *polvo de vidrio y fibras de plástico*, la investigación realizada por Brahim, J. et al. [95], demuestra que, aumentando, tanto el porcentaje como el tamaño de las fibras, se obtenían resultados de resistencias mecánicas excelentes y consiguiendo un nuevo material que mejora las propiedades mecánicas del yeso.

Marrero, M. et al. junto a otros investigadores [96], añaden a la mezcla: 60% de *orujillo*, *vermiculita* 9,5% y *fibras de polipropileno y de vidrio* 1,5%. Formando un compuesto que cumple con las exigencias mínimas de resistencia a compresión y flexión, exigidas.

Aparte de mejorar las resistencias mecánicas del yeso con residuos industriales, hay otros investigadores que han encontrado materiales compuestos a base de yeso en los que, si se incorpora algún tipo de residuo mejoran otras propiedades como son el aislamiento acústico y la resistencia al fuego. Entre ellos, se pueden destacar:

Los *lodos de escoria de altos hornos* son los elegidos por Morsy, M. [97] en matrices de yeso. Estudiando el comportamiento de la mezcla ante el fuego y aislamiento acústico. Afirmando que se obtienen mejores resultados con mezclas y residuos, que sin ellos.

Los resultados obtenidos en la investigación de Rodríguez, A. et al. [98] con residuos procedentes de la *combustión de orujillo*, determinan que los valores de conductividad térmica son mejores con adición de residuo, que sin él. Siendo incluso superiores a los mínimos exigidos por la norma.

Aksoganb, O. et al. [99] en sus investigaciones con *cáscara de maní, cebolla, perlita y piedra pómez* compara las diferentes mezclas resultando que todas las mezclas del yeso con los diferentes residuos, cumplen las resistencias a compresión y flexión mínimas exigidas. Los coeficientes de conductividad térmica y acústica fueron más pequeños con las mezclas de piel de cebolla y cáscara de maní que con el yeso-perlita, yeso-pómez. Los compuestos con piedra pómez y perlita tienen menor absorción a los rayos ultravioletas.

La *bentonita* es otro de los residuos industriales utilizados por Jiang, J. et al. [100]. Concluye que el empleo de este residuo en matriz de yeso, le confiere mayor porosidad por lo que se disminuye la conductividad térmica logrando un material idóneo para el aislamiento térmico.

La investigación llevada a cabo por Ding, X. et al. [101] en la que analizan el comportamientos del yeso al que se ha añadido *colágeno extraído del cuero*. Los resultados apuntan que la adición de este residuo retarda el tiempo de fraguado del yeso, aumenta su plasticidad, pero disminuyen la resistencia.

M. Serhat et al. [102] analiza que, la densidad aparente del yeso al que se han añadido *gránulos de sílice* disminuye notablemente por lo que mejora la durabilidad a altas temperaturas del yeso.

Por otro lado, AA Khalil; et. al [103] también utilizan residuo de *sílice* como adición en su trabajo de investigación. Utilizaron diferentes formas de sílice, en grano, arena y humo mezclándolas con el yeso. Comprueban que, en general, aumenta la resistencia a compresión cuando el tamaño de partícula es mayor, la porosidad también aumenta y la densidad aparente gracias a la matriz que se forma disminuye, obteniéndose un material más ligero.

Balti, S. et al. [104] Realizan un estudio encaminado a optimizar y desarrollar un material a base de yeso mediante la incorporación de diferentes residuos. Realizan un estudio estadístico para determinar la influencia de la adición de papel, poliestireno y fibras de poliéster. Determinaron las propiedades mecánicas, físico térmicas y el comportamiento ante el fuego. El análisis estadístico pone de manifiesto la influencia significativa de todas las variables sobre las propiedades del yeso; las fibras de poliéster mejoran notablemente la resistencia a la flexión cuando se combinan con los residuos de papel y poliestireno, logrando con la mezcla, un equilibrio entre las propiedades físicas y mecánicas. El nuevo material muestra un comportamiento dúctil. También se mejora la resistencia ante el fuego.

Entre los diferentes estudios y artículos encontrados, se pueden destacar los que añaden al yeso *material cerámico*, como el estudio de Santos Jiménez, R. et al. [105] observando que las resistencias mecánicas son inferiores pero que en cambio, la dureza superficial, la absorción y adherencia, mejoran con la adición del producto cerámico.

Por otro lado, en el trabajo realizado por Beldjilali, S. et al [106], se llegó a la conclusión que añadiendo *ladrillo de desecho* logran mejorar las resistencias mecánicas, la adherencia y la resistencia a la absorción del agua.

Para la formación de material compuesto, Villoria Sáez, P. et al. [107] añaden *vidrio procedente de carpinterías*. Haciendo que el material resultante sea más denso y las características mecánicas mayores, que con el material sin adición.

Con los residuos procedentes de *placas de cartón-yeso*, Erbs, A. et. al [108] obtienen nuevas placas, que cumplen con las especificaciones mínimas físicas y mecánicas, que exige la norma brasileña. Dotando una vida a dicho residuo. Un modelo de economía circular, excepcional.

Para concluir se han introducido aquí las investigaciones de Romero-Gómez, M.A. et. al [109] por la peculiaridad de la obtención de su residuo (fibras de polipropileno) de *toallitas húmedas*. Como resultado obtiene que la densidad seca del yeso disminuye con el aumento de la adición de fibras del PP obtenidas de las toallitas de desecho. A pesar de demostrar una reducción en las resistencias mecánicas sigue cumpliendo con los límites exigidos. En cuanto a la adherencia no se apreciaron cambios significativos.

Y la investigación de Mónica Morales-Segura, et. al [110] utiliza *residuos de cigarrillo* obteniendo un material compuesto que mejora las propiedades mecánicas del yeso sin residuo. Sin embargo, la adherencia del material no es buena.

2.2. ANÁLISIS CICLO DE VIDA.

Para cuantificar el impacto positivo en el medio ambiente que se logra con la creación de nuevos materiales y productos ecoeficientes en la construcción, varios investigadores han utilizado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para cuantificar estos efectos [111].

Destacan los trabajos realizados por Fořt, J. et al. quienes han estudiado, entre otros asuntos, el beneficio medioambiental de reutilizar residuos cerámicos en diversas aplicaciones constructivas [112] y en la reutilización de residuos de yeso para la generación de nuevas pastas [113].

Por su parte, Pedreño-Rojas, M.A. et al. [114], en sus investigaciones centradas en la reutilización de residuos como agregados en pastas de yeso, incorporan a las mismas sendos estudios de ACV evaluando la mejora medioambiental alcanzada en los mismos [115].

Romero-Gómez, M.I. et al. [116] desarrollaron piezas alveoladas de yeso con residuos plásticos para su empleo en particiones de edificación. En dicha investigación incorporan un estudio exhaustivo de ACV del producto, comparando los resultados obtenidos con los que se obtendrían en piezas sin ningún tipo de residuo en su matriz [117]. Finalmente, resaltar el trabajo realizado por Rodrigo-Bravo et al. [118], quienes hicieron un estudio comparativo de ciclo de vida de placas de yeso convencionales con otras realizadas por residuos de poliuretano en la matriz [119].

2.3. CONSIDERACIONES PARCIALES

Analizando los diferentes artículos, tesis e investigaciones encontradas sobre el yeso con residuos. Se puede apreciar que los compuestos obtenidos con residuos de madera en general tienen un mejor comportamiento al aislamiento acústico y térmico, menor densidad y resistencias mecánicas, pero siempre cumpliendo con las mínimas exigidas por la norma.

Por otro lado, las mezclas de yeso con residuos agrícolas se comportan de manera favorable en cuanto a la absorción de agua, disminuyendo la resistencia a flexión y

compresión, excepto en los casos de residuos agrícolas con fibras que éstas ayudan a mejorar esa carencia.

Con los residuos Industriales, en general, se consiguen mezclas que mejoran la conductividad térmica y disminuye la densidad, obteniéndose materiales más aislantes. Las resistencias mecánicas son menores. Por tanto, los materiales obtenidos son más aptos para placas aislante o prefabricados.

Son los residuos de construcción (RCD) cuya naturaleza son diferentes a las placas de yeso reutilizadas los que difieren en el comportamiento al yeso sin adición. Obteniendo valores óptimos en cuanto al aislamiento acústico, la densidad y la absorción de agua. Generando materiales más ligeros.

En último lugar, los residuos con polímeros, aun analizando diferentes composiciones (PET, PS...), mejoran la absorción de agua, la densidad, la porosidad...haciendo que los compuestos obtenidos sean más ligeros y siempre estén dentro de los límites de la normativa, aunque las resistencias mecánicas disminuyan.

Son muchas las aplicaciones de los compuestos a base de yeso: desde revestimientos interiores a prefabricados, morteros etc.

Todas las investigaciones buscan encontrar un material que, fabricado adicionando diferentes residuos, mejoren las propiedades del yeso, contribuyan en el reciclaje de dichos residuos y ayuden a minimizar la utilización de recursos naturales.

De la bibliografía consultada, se deduce que existen numerosas investigaciones sobre matrices de yeso y caucho sintético, pero no se han encontrado trabajos que analicen mezclas de yeso-caucho natural (procedente de pelotas de pádel-tenis). Por tanto, es imprescindible, dada la alta demanda de utilización de pelotas de tenis-pádel (que va en aumento por ser deportes cuya práctica está cada vez más extendida) estudiar la viabilidad de utilizar estos residuos en materiales compuestos a base de yeso, para conseguir elementos de la edificación que contribuyan en la reutilización de dichos residuos minimizando su presencia en vertederos y contribuyendo así en la lucha contra la contaminación ambiental

JUSTIFICACIÓN

CAPÍTULO 03.

CAPITULO 3: JUSTIFICACIÓN

En virtud de lo anteriormente expuesto; la preservación del medio ambiente, mediante la reutilización de residuos, la búsqueda de nuevas aplicaciones y el ahorro de energía en los edificios, se puede contribuir significativamente a un desarrollo sostenible. Por tanto, es fundamental investigar sobre todos estos aspectos para lograr alcanzar dichos objetivos. En esta investigación se pretenden afrontar mediante:

- La utilización de residuos que se acumulan en vertederos o terminan incinerándose y mezclándolos con materiales naturales. Consiguiendo una desaparición parcial de materiales de desecho, minimizar la utilización de recursos naturales. Contribuyendo a una mejora del entorno e incluyendo los residuos en un proceso de economía circular.
- Por otro lado, estudiando el comportamiento de los nuevos compuestos para tratar de encontrar materiales idóneos para la edificación sostenible.
- Y finalmente evaluando el beneficio energético y medioambiental de los compuestos. Tratando de progresar en el confort de las edificaciones con materiales más aislantes añadiendo una mejora al medio ambiente, ya que se reduce la utilización del yeso y se minimiza el consumo de energía.

OBJETIVOS

CAPÍTULO 04

CAPITULO 4: OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis es estudiar los efectos producidos por la adición de residuos de pelotas de pádel/tenis en productos de yeso para la construcción, evaluando el potencial físico, mecánico, energético y medioambiental de dicha incorporación.

Para ello, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

OBJETIVO 1 (OB1): Estudiar los efectos producidos por la adición de residuos de pelotas de pádel/tenis en compuestos de yeso para construcción.

OBJETIVO 2 (OB2): Desarrollar una aplicación constructiva con compuestos de yeso y residuos de pelotas pádel/tenis, en edificación.

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 05

CAPITULO 5: METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos de esta investigación, la metodología seguida engloba las siguientes fases, mostrada en la Figura 25.

Para conseguir el primer objetivo específico, la metodología se divide en:

- Fase 1.1: “Caracterización de la materia prima: yeso y residuos de pelotas de pádel/tenis”.
- Fase 1.2: “Caracterización del compuesto de yeso con residuos de pelotas de pádel/tenis”.

Finalmente, la metodología llevada a cabo para conseguir el segundo objetivo específico de la tesis es:

- Fase 2.1: “Planteamiento y caracterización de aplicaciones constructivas en edificación, desarrolladas con los nuevos compuestos de yeso elaborados”.
- Fase 2.2: “Evaluación del beneficio energético y medioambiental al incorporar los residuos de pelotas de pádel/tenis en las nuevas aplicaciones desarrolladas.”

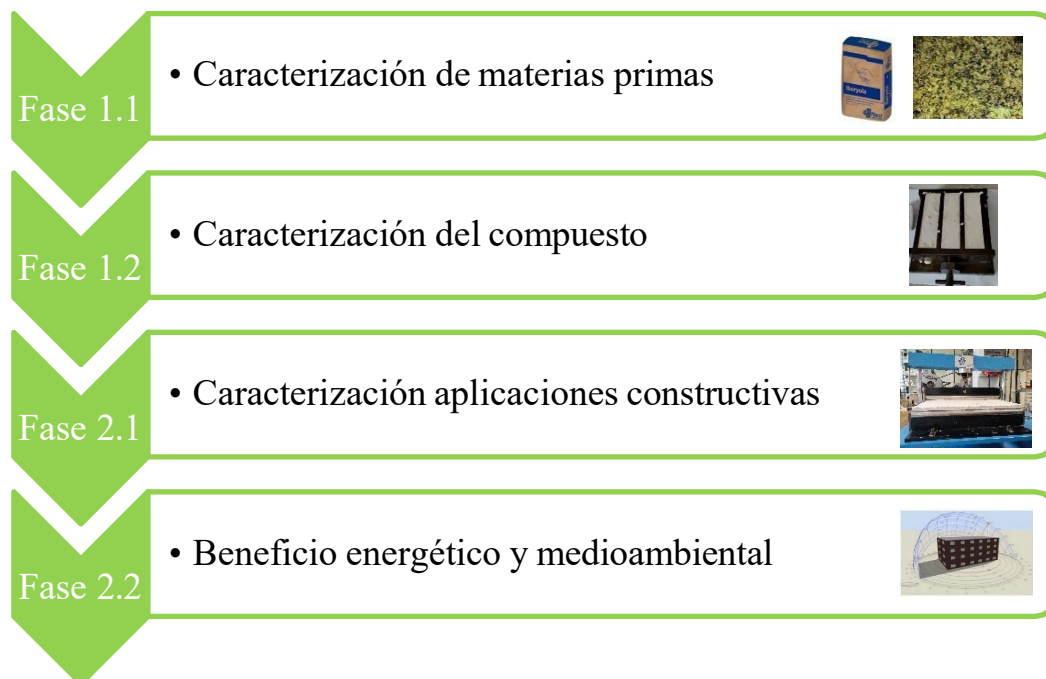


Figura 25. Fases de la investigación.

En las fases mencionadas, se realizan una serie de ensayos y análisis para estudiar las diferentes propiedades y analizar el comportamiento de las materias primas, los compuestos y las placas. Estos se muestran en la Tabla 6.

	Ensayo	Materia prima	Compuesto	Placa
Ensayos físicos.	Granulometría	x	x	
	Relación w/y	x	x	
	Densidad aparente		x	
	Conductividad térmica		x	
Ensayos mecánicos	Resistencia Flexión		x	x
	Resistencia Compresión		x	
	Dureza shore C		x	
	Resistencia choque-impacto			x
Ensayos mineralógicos	Difracción rayos x	x		
Observación microscópica	M.Electrónica de barrido SEM		x	
	Tomografía computarizada rayos X (XCT)		x	
Ensayos hídricos	Retención agua		x	
	Absorción total de agua		x	
	Absorción por capilaridad		x	
	Cámara húmeda		x	
Ensayos térmicos	Reacción fuego		x	

Tabla 6: Ensayos realizados para la caracterización de las materias primas, compuestos y placas.

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: YESO, RESIDUOS DE PELOTAS DE PÁDEL/TENIS (Fase 1.1)

En este apartado previamente se describen los materiales utilizados para la elaboración de los ensayos: Escayola y residuos de pelotas de pádel/tenis.

El yeso es uno de los materiales más utilizados y con mayor tradición en la industria de la construcción. Debido a las diferentes formas de fabricar el yeso y la variedad de aditivos que mejoran y ajustan el producto a las necesidades del mercado, existen muchos tipos de yeso según Tabla 2 descrita en el apartado 1.2.3.

Para la fabricación de probetas de ensayo en el laboratorio se emplea Yeso E-35 de fraguado rápido (Figura 26), clasificado como tipo A según EN 13279-1[38] suministrado por la empresa *Placo Saint-Gobain* (Saint-Gobain Placo Ibérica, S.A.) situada en San Martín de la Vega, Madrid (España).

El producto posee marcado AENOR y certificado CE. La hoja de datos técnicos de PS-G (Placo Saint-Gobain) indica las siguientes especificaciones:

- Índice de pureza > 90%
- Tamaño de grano 0-2 mm
- Resistencia a la flexión 3 N/mm²
- Conductividad térmica 0,30 W/mK.
- Relación w/y= 0,8 a 1 Litro/Kg
- PH > 6
- Resistencia al fuego A1

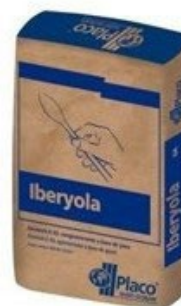


Figura 26. Escayola Iberyola – Placo

El agua empleada en la confección de probetas cumple con las características técnicas fijadas en la norma UNE EN13279-2 [120] se trata de agua potable procedente del Canal de Isabel II de Madrid.

Los residuos que se utilizan se clasifican según su origen y composición tal y como se muestra en (Figura 27) en residuos industriales (del proceso de fabricación de las pelotas) y residuo del producto (restos de las pelotas al final de su vida útil):

- **Residuo industrial:** Durante la fabricación de las pelotas de pádel/tenis se producen dos tipos de residuos, por un lado, los recortes procedentes de la lámina de caucho y otro recorte de la lámina del fieltro. Estos residuos han sido facilitados por la fábrica FU- JEN CHEMICAL CO., LTD ubicada en Taiwán desde 1974.
 - a. ***Caucho natural vulcanizado:*** residuo del material sobrante de la lámina de caucho utilizada en el proceso de fabricación de las pelotas. Los residuos de caucho no pueden volver a recuperarse dentro del ciclo de producción ya que se han convertido en un plástico distinto con características termoestables. Por lo tanto, se deben buscar otras vías de utilización cuestión que aborda la presente investigación. Se caracteriza por ser elástico, resistente al desgaste y con un rebote controlado.
 - b. ***Fieltro:*** residuos de poliamida (fibras de nylon 37%, algodón 13% y lana de oveja de 50%), procedente del material sobrante de la lámina de fieltro usada en el proceso de fabricación de las pelotas de pádel.
Este residuo se puede incorporar a la fabricación de nuevos fieltros como materia prima secundaria. Siendo el Nylon un polímero termoplástico, con propiedades de resistencia, elasticidad y dureza, buenas; fácil de mecanizar con buena resistencia a las sustancias químicas e indeformable por la temperatura entre – 40°C y 100°C.
- **Residuo del producto:** Obtenido de la trituración de la propia pelota de pádel/tenis cuando dejan de servir para la práctica del deporte por no tener suficiente presión, pero con sus características inalteradas.

- a. **Fieltro + Caucho:** Residuos procedentes de las mismas pelotas de pádel/tenis obtenidos en diferentes centros polideportivos y de particulares. De no conseguir una nueva utilización para estos residuos terminarían en los vertederos.

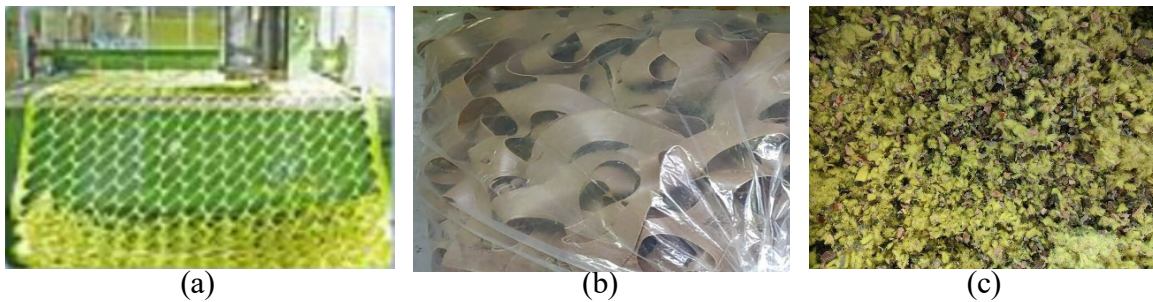


Figura 27. a) Residuo de fieltro; b) Residuos de caucho; c) Fieltro + caucho triturado de residuos de pelotas.

Todos los residuos, han sido triturados en diferentes tamaños por la empresa *Caucho Celular Del Centro, S.A. CACESA*, situada en Moraleja de Enmedio (Madrid) y tamizados por un proceso sencillo de mecanización de tal forma que el procedimiento resulta de bajo coste y sin emitir contaminantes. En esa tesis se utilizan los residuos comprendidos entre 4 y 6 mm que son los más abundantes (Figura 28).

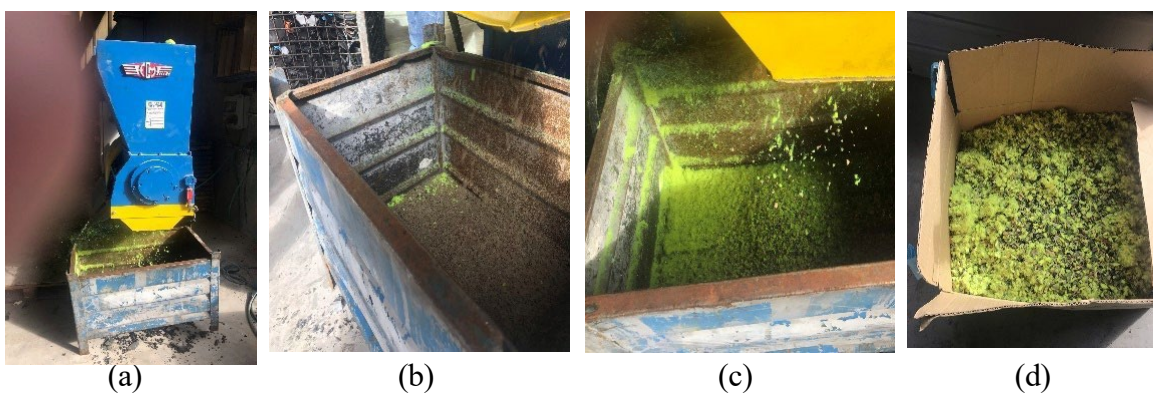


Figura 28. a) Máquina trituradora, b y c) Trituración residuo industrial, d) Trituración residuo producto.

Para la caracterización de las materias primas se han realizado una serie de ensayos físicos y se han aplicado técnicas de observación y análisis que se describen a continuación:

a) Ensayos físicos:

Granulometría

b) Análisis mineralógicos y químicos:

b.1 Difracción de rayos X

b.3 Microscopía electrónica de barrido SEM

5.1.1. Ensayos físicos

▪ Granulometría de los residuos:

La norma UNE-EN 933-1 [121] define a los áridos como “*materiales granulares utilizados en construcción que pueden ser naturales o artificiales*”. Los residuos de esta investigación son acordes a esa definición, pudiéndose realizar la granulometría de los residuos adaptando el ensayo definido en la misma norma. Se realizó en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

El procedimiento consiste en hacer pasar una cierta cantidad (1kg) de material por la columna de tamizado constituida por tamices de diferentes aberturas ordenados de mayor a menor, siguiendo la serie 32-16-8-4-2-1-0.5-0.25-0.125 y 0.063 (mm), de luz de malla. Se agita en tamizadora mecánica y se pesa el material retenido en cada uno de los tamices (Figura 29 y Figura 30).

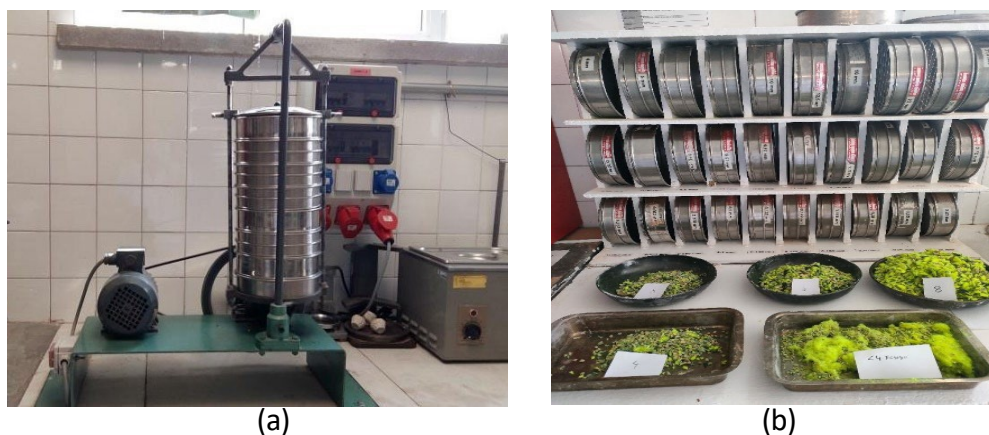


Figura 29. a) Columna de tamizado. b) Separación del residuo por tamaños



Figura 30. Clasificación de los residuos tamizados

5.1.2. Análisis químicos, mineralógicos y observación mediante microscopía

▪ Difracción de rayos X

Para conocer la composición mineralógica del yeso se ha realizado un análisis mediante Difracción de Rayos X según la norma UNE-EN 13925-3 [122]. El análisis se ha realizado en el Laboratorio de Análisis Químico de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

El difractograma se ha obtenido en un rango entre $5^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$ cada 0.04° , 1 segundo por paso con un difractómetro de polvo Siemens D5000 con ánodo de Cu y monocromador de grafito (Figura 31).



Figura 31. Equipo de Difracción Rayos X.

▪ Microscopía electrónica de barrido SEM

Para el estudio morfológico y microestructural de los materiales se han observado las muestras mediante el microscopio electrónica de barrido (acrónimo en inglés, SEM). El cual, a través de un gran número de radiaciones electrónicas sobre la muestra permite adquirir información gráfica a partir de las imágenes microscópicas obtenidas en dicho ensayo.

Las imágenes SEM que se muestran en esta tesis doctoral se han tomado con un microscopio electrónico de barrido de alta resolución FEI TENE0 (Figura 32) perteneciente a los Servicios Generales de Investigación de la Universidad de Sevilla.



Figura 32. Izquierda: equipo SEM-FEI TENE0 para la realización de las muestras. Derecha: muestras metalizadas para su análisis.

Las muestras observadas son extraídas de pequeños fragmentos del material por separado, del residuo de la fibra, del caucho y en conjunto (fieltro + caucho). Colocadas sobre portamuestras cilíndricos de acero inoxidable, y recubiertas con oro, para hacerlas conductoras.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPUESTOS DE YESO Y RESIDUOS DE PELOTAS DE PÁDEL/TENIS” (Fase 1.2).

Este apartado se detalla el plan experimental llevado a cabo para alcanzar el objetivo 1:

1. Confección de probetas
2. Ensayos “plan experimental”
3. Análisis estadístico

5.2.1. Elaboración de probetas

Para fabricar las probetas de yeso y residuos y realizar los ensayos de esta tesis doctoral, previamente se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica para, en base a estudios similares, determinar el porcentaje de residuo y la relación agua/yeso (w/y) óptimos de amasado.

Según establece el fabricante, para un yeso E-35 se considera una buena relación w/y entre 0,8 y 1. Osmar Gencel et al. [65] en su investigación, observaron que empleando una relación de $w/y = 1$ los valores de resistencias mecánicas no alcanzan los mínimos de establecidos por la Norma [38]. En este trabajo también se ha comprobado que, empleando esa dosificación, ocurría lo mismo. Otros estudios similares al de esta tesis, como los de Ángel Serna [60], Mónica Morales [110], K.sures[72]; entre otros, emplean como relación w/y valores comprendidos entre 0,7 y 0,8. Por todo ello, en ésta investigación se decidió, en una primera fase, estudiar el comportamiento mecánico de los materiales compuestos fabricados empleando tres relaciones agua/yeso (1;0,8;0,7).

En cuanto al porcentaje de residuo añadido, los trabajos consultados se pueden clasificar en dos tipos: aquellos que estudian el comportamiento mecánico y los que investigan el comportamiento térmico y acústico. Los primeros, en los que normalmente se emplean materiales densos o en forma de fibra como adiciones, utilizan porcentajes más bajos de residuos.

Es el caso de Aldi Kugo et al.[70] que emplean un 6% de fibras de cáñamo, Jiménez,A. et al. [58] que estudia el comportamiento mecánico de yeso/caucho utilizando entre 1,25-7%.

Por otro lado, los que investigan sobre el comportamiento térmico y acústico o residuos ligeros agregan un porcentaje de residuos más elevado como es el caso de Oliveira et al. [81] que llega a utilizar entre un 25-40% de poliestireno o Yasing,M. que, empleando porcentajes de 20-30-50% de polvo de teja se observa una mejora en el comportamiento térmico. En vista de lo anterior, para esta tesis se comenzó estableciendo unos porcentajes de 10-15-20% para los compuestos de yeso con residuos de caucho y de caucho+filtro, mientras que para el compuesto de yeso con sólo filtro se incorporaron un 5-7-10% debido a la poca trabajabilidad que resultaba con la incorporación de cantidades mayores.

En cuanto al tamaño del residuo, hay estudios encaminados a establecer su comportamiento según el tamaño de partícula, como es el caso de Zhu, C. [67] que estudiaron fibras de PVA, o Jiménez Rivero, I. et al. [58] que emplea tamaños de caucho de 1 a 25 mm. Para esta investigación, se ha optado por un tamaño de 4-6 mm para todas las adiciones y en todas las fases debido a que es la cantidad más abundante obtenida del mecanizado simple de las pelotas.

Una vez establecidas las relaciones agua/yeso y los porcentajes en peso respecto al yeso de adiciones, se fabricaron las probetas siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 13279 [120]. Se mezcla el yeso con las adiciones hasta formar una masa homogénea y lentamente se añade al agua de forma gradual amasando el conjunto durante dos minutos.

La mezcla se vierte en los moldes de acero con tres compartimentos de 40 x 40 x 160 mm rellenando bien huecos y esquinas, y se compacta dejándolo caer desde una altura de 7 cm, unas tres veces sobre la mesa de trabajo para evitar la segregación y eliminar las burbujas de aire. Pasado unos minutos se alisa la probeta sin ejercer presión sobre la pasta, retirando el material sobrante. En la Figura 33 se muestra el proceso de fabricación de probetas.

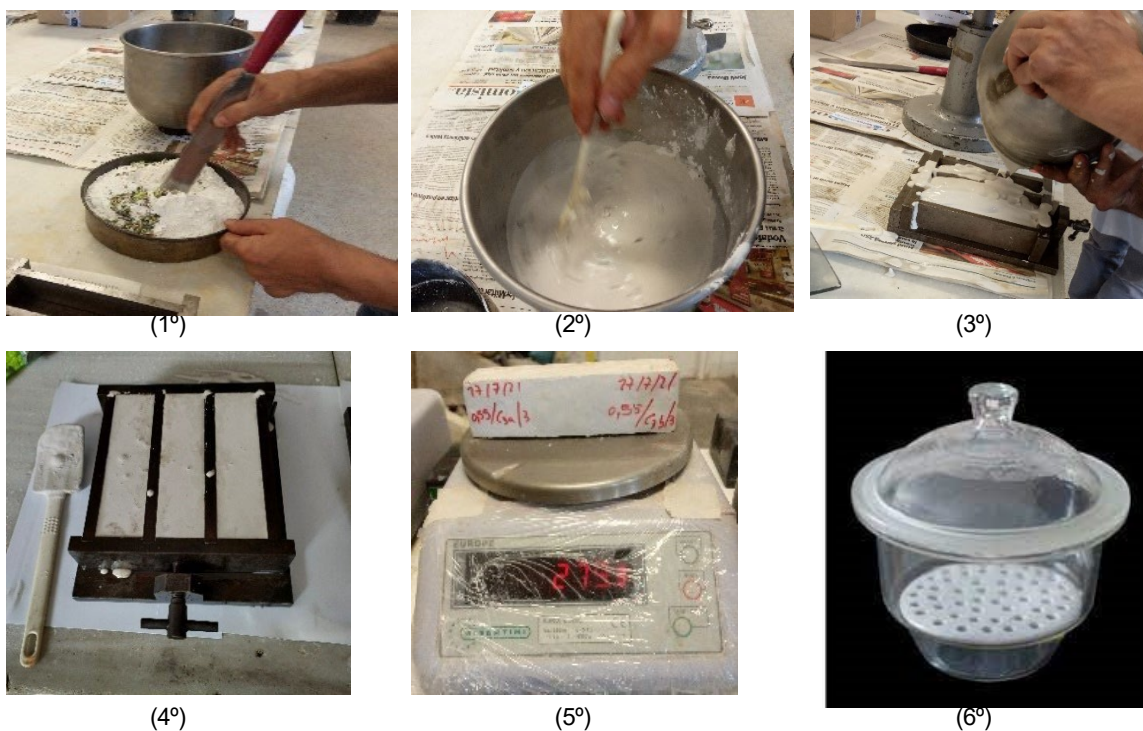


Figura 33. Proceso de confección de probetas

Una vez fraguadas las probetas y con resistencia suficiente, se desmoldan, identifican y pesan. Posteriormente, se dejan en el ambiente de laboratorio durante 7 días en condiciones atmosféricas $50 \pm 5\%$ de humedad relativa y $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y se vuelven a pesar. A continuación, se introducen en la estufa a una temperatura de $40 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24h para ser desecadas hasta masa constante y, finalmente, se dejan enfriar en desecador, hasta alcanzar la temperatura ambiente del laboratorio. Siguiendo el procedimiento anteriormente expuesto se fabrican dos grupos de probetas:

- **Probetas de Referencia:** Son probetas fabricadas con el yeso E-35 pero sin ningún residuo y con las relaciones de agua/yeso determinadas para este trabajo de 1-0,8-0,7; llamadas de referencia (ref.1; ref.0,8; ref. 0,7), que servirán para comparar los resultados con las probetas que tienen diferente % de adición. Realizando un total de **9 probetas** de referencia.
- **Probetas de yeso con residuos de pelotas de pádel/tenis:** Se utilizaron un total de **81 probetas** de 40 mm × 40 mm x 160 mm según el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 13279-2 [120] y explicado en el apartado 5.3.1. Abarcando las tres relaciones agua/yeso establecidas para esta tesis, los tres tipos de residuos se designan como fieltro (F), caucho (C) y caucho+fieltro (CF). Se agregaron al yeso en 3 porcentajes diferentes, cuya nomenclatura es la siguiente: baja(B), media (M) y alta (A). Dichos porcentajes se corresponden con 10,15 y 20% (respecto al peso de escayola utilizado) para el caso de caucho+fieltro (CF) y caucho (C); y de 5,7,10% para el fieltro (F). El tamaño de partícula del residuo está dentro del intervalo de 4 a 6mm, según se ha detallado en el apartado 5.3.1 de este documento.

SERIE	DESIGNACIÓN	RELACIÓN AGUA/YESO (W/Y)	TIPO DE RESIDUO	PORCENTAJE DE RESIDUOS (%)
#0	Ref. 1	1		
	Ref. 0,8	0,8	-	0
	Ref. 0,7	0,7		
#1	1-C-M	1		15
	0,8-C-B			10
	0,8-C-M	0,8		15
	0,8-C-A		Caucho (C)	20
	0,7-C-B			10
	0,7-C-M	0,7		15
	0,7-C-A			20
#2	1-CF-M	1		15
	0,8-CF-B			10
	0,8-CF-M	0,8		15
	0,8-CF-A		Caucho y fieltro (CF)	20
	0,7-CF-B			10
	0,7-CF-M	0,7		15
	0,7-CF-A			20
#3	1-F-M	1		7
	0,8-F-B			5
	0,8-F-M	0,8		7
	0,8-F-A		Fieltro (F)	10
	0,7-F-B			5
	0,7-F-M	0,7		7
	0,7-F-A			10

Tabla 7 :Resumen de muestras según relación agua/yeso, tipo y cantidad de residuo.

La Figura 34 muestra una serie de probetas en los moldes y desmoldadas para la realización de ensayos.



Figura 34. Tipos de probetas para realización de ensayos.

En una segunda fase, y en vista a los resultados alcanzados en la caracterización físico-mecánica de los materiales compuestos anteriores, y en base al análisis estadístico de los resultados obtenidos, se decide ampliar el estudio experimental y elaborar una nueva serie de probetas empleando una menor relación agua/yeso (siempre dentro de los rangos de trabajabilidad admisibles por normativa), con el objeto de mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas. En este caso, y con el fin de acotar el alcance de la investigación, se establece como único residuo para el estudio, el obtenido directamente de la pelota triturada (CF), ya que es el residuo más común y abundante y se incrementa el contenido de adición hasta un 25% (designado como A+) en peso.

La Tabla 8 recoge todas las mezclas (composición y designaciones) desarrolladas en esta segunda fase de la investigación.

SERIE	DESIGNACIÓN	RELACIÓN AGUA/YESO (W/Y)	TIPO DE RESIDUO	PORCENTAJE DE RESIDUOS (%)
#0`	Ref. 0,5	0,5	-	0
	Ref. 0,6	0,6		
#4	0,6-CF-B	0,6	Caucho y fieltro (CF)	10
	0,6-CF-M			15
	0,6-CF-A			20
	0,6-CF-A+			25
#5	0,5-CF-B	0,5	Caucho y fieltro (CF)	10
	0,5-CF-M			15
	0,5-CF-A			20
	0,5-CF-A+			25

Tabla 8 : Resumen de muestras según relación agua/yeso, tipo y cantidad de residuo. 2ª Fase.

En ambas fases los porcentajes de residuos y el tipo, a modo de resumen quedan definidos según la Tabla 9.

TIPO RESIDUO	% RESIDUO
C= Caucho CF= Caucho + Fieltro	B= 10%
	M= 15%
	A= 20%
	A+= 25%
F= Fieltro	B= 5%
	M= 7%
	A= 10%

Tabla 9 :Designación de los compuestos según tipo y cantidad de residuo.

5.2.2. Ensayos plan experimental 1ª y 2ª Parte.

La preparación de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, dicho laboratorio posee unas condiciones ambientales de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura y una humedad relativa de $50 \pm 5\%$. Y las pruebas experimentales se realizaron además en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM) y Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla (ETSA).

La caracterización del compuesto se realizó mediante la estimación de los siguientes parámetros:

- Consistencia de la pasta según UNE-EN 13279-2 [120].
- Densidad según UNE-EN 102042:2014 [123]
- Dureza superficial, SHORE C, según UNE 102042 (UNE-102042, 2014)
- Resistencia a la flexión y a la compresión según UNE-EN 13279-2
- Microscopia electrónica de barrido (SEM)
- Tomografía computarizada de rayos X (XCT)
- Absorción total de agua
- Absorción de agua por capilaridad RILEM RC 25-PEM.
- Resistencia a la flexión y a la compresión según UNE-EN 13279-2 y dureza superficial, SHORE C, según UNE 102042. Después de conservarse en cámara húmeda.
- Comportamiento frente al fuego.
- Coeficiente de Conductividad térmica. UNE-EN 12667 [124]

➤ Consistencia de la pasta

De los tres procedimientos que describe la norma UNE EN 13279 [120] para determinar la relación agua/yeso de los compuestos que garanticen una buena consistencia y trabajabilidad: Método por saturación, fluidez de la pasta o mesa de sacudidas.

En esta tesis se ha empleado el de la mesa de sacudidas que es el utilizado para yesos premezclados.

Se pesan y mezclan los residuos, el agua y el yeso con la proporción elegida. Se remueve manualmente durante un par de minutos, mezclando y homogeneizando la masa. Se rellena el molde troncocónico Figura 35 colocado en la zona central del vidrio dispuesto en la mesa de sacudidas, hasta el límite superior quitando la pasta sobrante.

Después de dejar reposar la mezcla alrededor de 15 segundos, se levanta verticalmente el cono y se aplican 15 golpes, mediante la mesa de sacudidas, a una velocidad constante de 1 revolución por segundo.



Figura 35. Mesa de sacudidas.

El diámetro de la galleta resultante se mide en dos direcciones perpendiculares con una precisión de 1 mm. La media de ambas medidas debe estar comprendida entre 160 ± 5 mm y 165 ± 5 mm (Figura 36).



Figura 36. Medición de la consistencia de la pasta.

La relación de agua/yeso queda definida por la expresión:

$$W/Y = m_3/m_4$$

W/Y = relación agua/yeso.

m_3 = es la masa del agua de amasado en gramos.

m_4 = es la masa del yeso en gramos.

➤ Densidad

Para la determinación de la densidad de las probetas, se sigue el método descrito en la Norma UNE-EN 102042:2014 [125]. Tras pasar las 24 h después de la fabricación de las probetas y tras haber sido desmoldadas, se pesan (peso húmedo) y se dejan en el laboratorio durante 7 días. Posteriormente las probetas se meten durante 24h en un horno a $T^a 40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, y se vuelven a pesar (peso seco). Obteniendo el resultado según la expresión:

$$D = Pd/Vol$$

D = densidad de la probeta en estado endurecido (g/cm^3).

Pd = peso de la probeta seco (g).

Vol.= volumen de la probeta (cm^3).

➤ Dureza Superficial SHORE C

Para determina la dureza superficial de los compuestos se realiza el ensayo de dureza Shore C especificado en la norma UNE 102042:2014[123].

Sobre dos de las caras longitudinales de cada probeta, se aplica una fuerza perpendicular con el durómetro en 5 puntos de cada una de las caras, se determina la media de los datos obtenidos para hallar el resultado de la dureza (Figura 37).



Figura 37. Determinación de la dureza superficial SHORE C

➤ Resistencia a flexión

La resistencia a flexión se determina según la norma UNE-EN 13279-2:2014 [120] con un equipo Autotest 200-10SW de Iberest. conectado a un equipo de control digital.

En primer lugar, las probetas de dimensiones normalizadas (40x40x160 mm) se apoyan sobre los rodillos separados 100mm de la máquina, y aplicando una carga en la parte superior centrada a velocidad constante (Figura 38). Se registra la fuerza máxima en el momento de la rotura. Siendo la resistencia a flexión el resultado de la media de los valores de las tres probetas. Determinándose el valor según la expresión:

$$R_f = 3/2(P \times L / ab^2)$$

siendo:

R_f = resistencia a flexión en N/mm^2 .

P = la carga de rotura en N.

L = longitud entre apoyos (mm).

a , b = dimensiones de la probeta (40 x 40 mm).



Figura 38. Ensayo de la resistencia a flexión.

➤ Resistencia a Compresión

La resistencia a compresión se determina ensayando las seis semi-probetas resultantes del ensayo a flexión. Cada una de las mitades obtenidas de cada probeta se sitúan sobre la placa de 40 x 40 mm de la máquina y se le aplica la carga hasta la rotura Figura 39. Obteniendo el resultado con la media de las dos determinaciones por probeta, según la expresión:

$$R_c = P / S$$

siendo:

R_c = resistencia a compresión en N/mm^2 .

P = carga de rotura en N .

S = superficie de apoyo (40 x 40 mm)

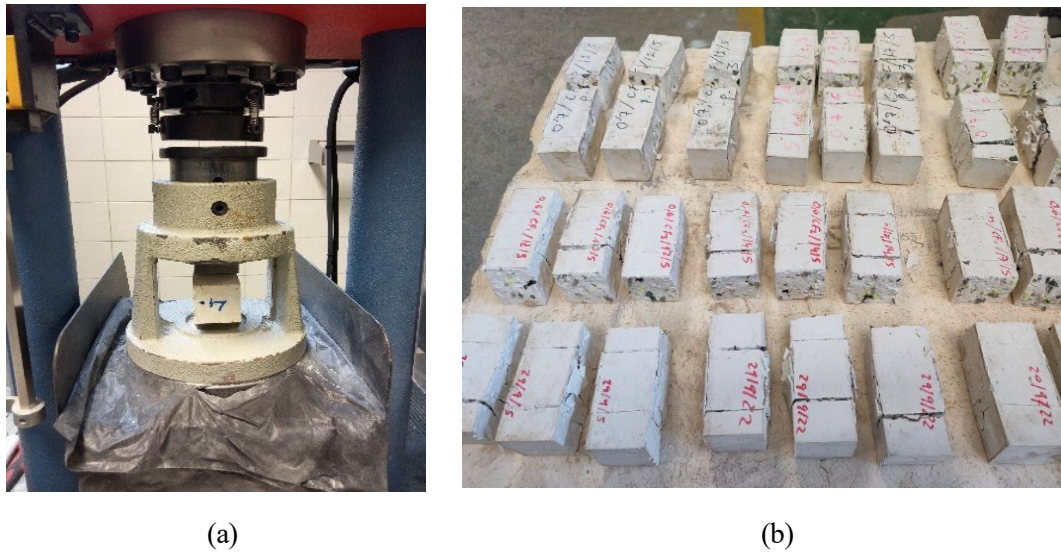


Figura 39. Ensayo de resistencia a compresión: a) Equipo Autotest de Iberest, b) Probetas sometidas al ensayo de compresión.

➤ Microscopía de barrido (SEM)

Siguiendo el mismo procedimiento empleado para la caracterización de los residuos, se hace uso de la metodología SEM con objeto de evaluar el comportamiento microscópico de las nuevas pastas elaboradas. Dicho estudio se centrará en la evaluación de la adherencia entre la matriz de yeso y los distintos tipos de residuos utilizados, con idea de así justificar los resultados obtenidos en la caracterización mecánica.

Las muestras ensayadas son extraídas de pequeños fragmentos de las probetas prismáticas utilizadas para los ensayos mecánicos, colocadas sobre porta muestras cilíndricos de acero inoxidable, y recubiertas con un pattering de oro, para hacerlas conductoras.

➤ Tomografía computarizada de rayos X (XCT)

Con el objetivo de obtener un modelado interno no destructivo de las pastas, para conocer la disposición de los residuos dentro de la mezcla, así como la porosidad, se emplea la técnica de XCT. Se utilizó el equipo de tomografía computarizada YXLON – Y. COUGAR SMT. El equipo tiene un tubo multifocal y una diana de tungsteno que le permite trabajar dentro del rango de 25 a 160 kV a 0,01 a 1,0 mA.

Dicho dispositivo ha permitido realizar inspecciones 2D y 3D con un aumento de 10000x y una resolución máxima inferior a una micra. Se utilizó el software VGStudio MAX 2.2.3 para post-producir y analizar las reconstrucciones 3D. El equipo de análisis XCT utilizado se encuentra ubicado en el área de los Servicios Generales de Investigación de la Universidad de Sevilla.

➤ Absorción total de Agua

Con probetas de 300 x 300 x 150 ($\pm 1,5$ mm), se ha realizado el ensayo de absorción total de agua según la norma UNE-EN 520 [126] en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Que consiste, en previo peso en estado seco de las muestras (Figura 40) se sumergen en agua, en un recipiente horizontal sin que toquen el fondo durante $2h \pm 2min$ (Figura 41). Una vez pasado ese tiempo se les quita el agua sobrante y se las vuelve a pesar.

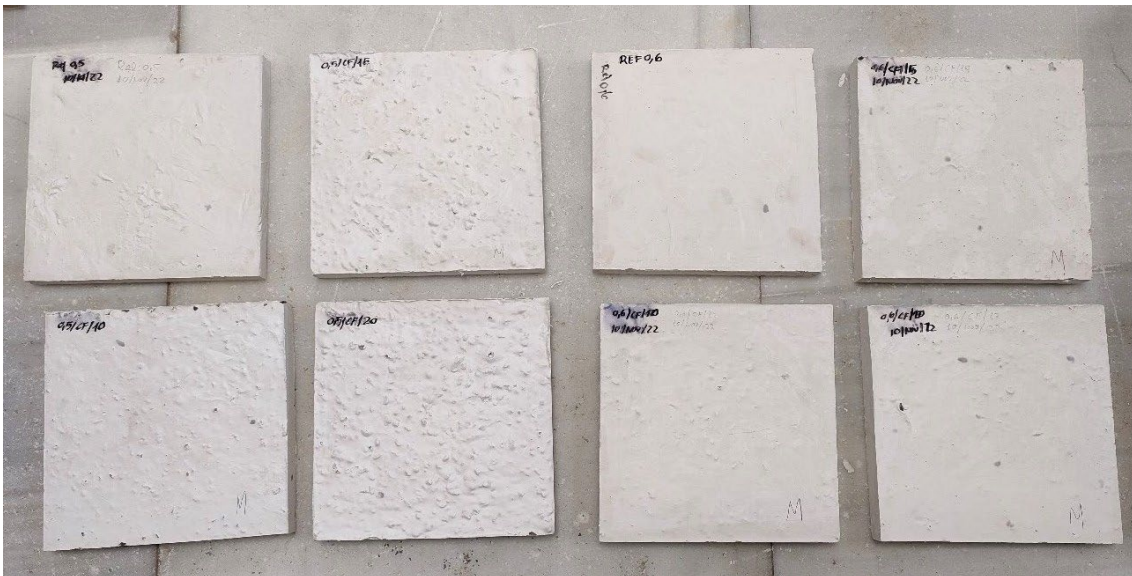


Figura 40. Muestras para el ensayo de Absorción de Agua



Figura 41. Muestra sumergida en agua.

➤ Absorción de agua por capilaridad RILEM RC 25-PEM

Se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, el ensayo de absorción de agua, basado en la norma RILEM RC 25-PEM (RILEM RC 25-PEM, 1980).

Una vez acondicionadas las probetas de 40x40x160mm en estufa 24 horas a $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, se introducen colocadas en posición vertical, sobre una bandeja con un nivel de agua que las rebase en $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$. (Figura 42). Cada minuto se va midiendo el nivel de agua alcanzado en cada cara hasta completar los diez minutos del ensayo. El resultado se expresa en milímetros por minuto.

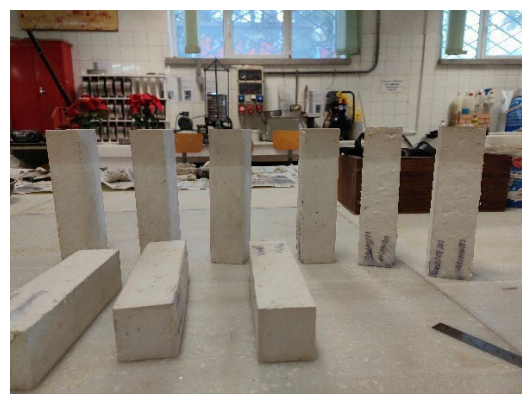
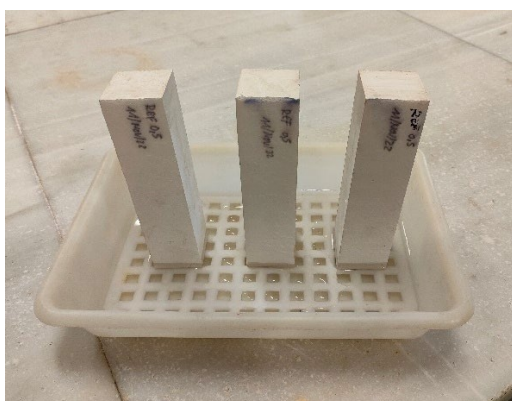


Figura 42. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

➤ Cámara húmeda

Durante cinco días, las probetas prismáticas se introducen en cámara húmeda a temperatura 21°C y una humedad relativa de 72% (Figura 43). A los 5 días se pesan las probetas y se determina el aumento de peso. Posteriormente en atmósfera de laboratorio se dejan durante una semana, comprobando su dureza SHORE C y resistencias mecánicas.

Siguiendo el ensayo no normalizado utilizado por del Río Merino en su tesis doctoral para analizar el comportamiento de los compuestos ante la humedad constante. Este ensayo se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.



Figura 43. Probetas en cámara húmeda.

➤ Comportamiento frente al fuego:

Para el estudio del comportamiento de los compuestos frente al fuego se ha realizado un ensayo real no normalizado a fuego directo en el Parque de Bomberos de la Comunidad de Madrid situado en Collado Villalba, utilizando la carga de fuego indicada en la norma ISO 834 (ISO 834, 2014).

El ensayo de resistencia al fuego de los materiales de construcción se basa en una curva de tiempo-temperatura definida en la ISO 834 que no representa ningún tipo de fuego natural (Figura 44), en cambio, un fuego real depende de la masa y energía de la estancia donde se produce, del tipo y cantidad de combustible y de las condiciones de ventilación existentes. El fuego real se desarrolla en cuatro fases: ignición, fuego latente, calentamiento y enfriamiento [127]

Se decide, por tanto, observar el verdadero comportamiento de los compuestos y acometer este tipo de ensayo.

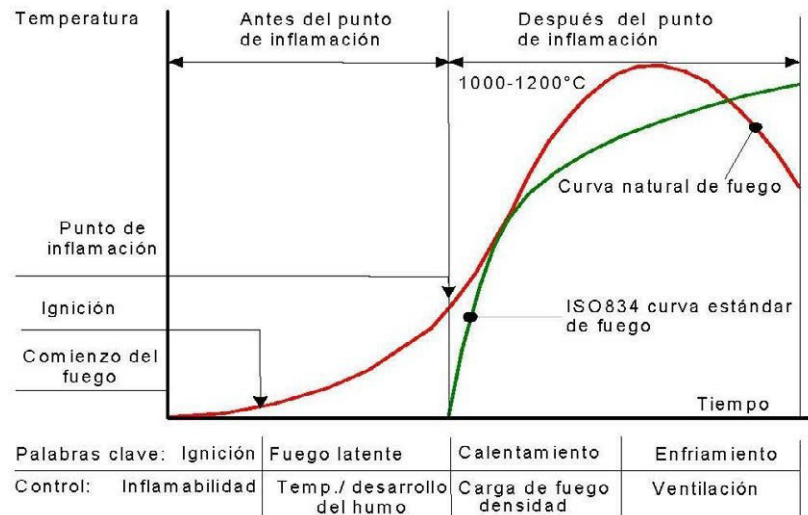


Figura 44. Fases de un fuego natural y fases de un fuego estandarizado [127]

Se realizan 4 series de tres probetas de 40 x 40 x 160 mm de relación de $w/y = 0,5$ y diferentes porcentajes de residuo (10,15 y 20%) dejándose 7 días en condiciones de laboratorio.

Siguiendo las indicaciones de la investigación de Vidales Barriguete, A. [128] se procede a la realización del ensayo. Una vez en el lugar del ensayo, se preparan las muestras sobre una parrilla de 1,00 m x 0,80 m en la que se colocan 20 kg de astillas de madera de pino como carga de fuego, cantidad estimada para un ensayo de 25 minutos. Las probetas se colocan en tres zonas (exterior, medio e interior) al fuego de tal manera que cada compuesto tenga una muestra en cada una de las zonas indicadas (Figura 45).



0,5/cf1/20 exterior	0,5/cf1/10 exterior
0,5/cf2/20 medio	0,5/cf2/10 medio
0,5/cf3/20 interior	0,5/cf3/10 interior
0,5/cf3/15 interior	ref3 0,5 interior
0,5/cf2/15 medio	ref2 0,5 medio
0,5/cf1/15 exterior	REF,0,5 exterior

Figura 45. Izquierda: preparación ensayo; Derecha: Posición de las probetas.

Posteriormente, se rocía la madera aproximadamente con un litro de gasolina y se prende el conjunto. Con un lector láser de temperatura modelo Testo 845 se toman diferentes lecturas en 3 puntos de cada probeta cada 5 minutos, hasta completar los 25 minutos estimados. La secuencia del proceso se muestra en la Figura 46.



a)



b)



c)



d)

Figura 46.: Proceso del ensayo a fuego a) Ignición, b) Calentamiento, c) Fuego latente, d) Enfriamiento.

➤ Conductividad térmica

Para determinar el comportamiento térmico de los compuestos, se determina el coeficiente de conductividad térmica según la norma UNE-EN 12667[124] con un equipo HFM 436 Lambda de Neszcht (Figura 47).en el laboratorio de acústica de la Escuela Técnica Superior de arquitectura de Madrid (UPM).



Figura 47. Equipo de medición de conductividad térmica. (HFM 436)

Para ello se utilizaron placas de 300 x 300 x 15mm realizadas para cada relación de agua/yeso de 0,5 y 0,6 y porcentajes de residuo 10,15,20,25% comparándolas con las de referencia sin residuos. Situando las placas a ensayar, entre las dos placas del equipo, que se estabilizan a diferente temperatura. Provocando un flujo de calor vertical entre ambas placas que atraviesa la muestra, según Figura 48.

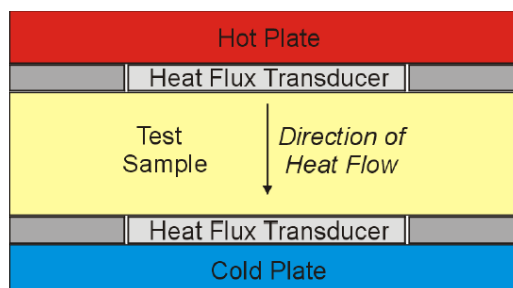


Figura 48: Esquema de funcionamiento equipo HFM.

Para determinar la conductividad térmica primeramente se calibra el equipo, realizando varias medidas a temperatura constante (Netsch, G.2012).

Obteniendo los valores según la ley de Fournier para régimen estacionario:

$$\phi = \lambda \cdot S \cdot \frac{t_1 - t_2}{e} \quad (1)$$

Siendo:

ϕ = flujo de calor que atraviesa la muestra (W).

λ = conductividad térmica obtenida (W/ (m K)).

S= superficie de contacto (m²).

t₁-t₂= diferencia de temperatura entre las placas (K).

e = espesor de la muestra (m).

5.2.3. Análisis estadístico.

Una vez terminada la 1ª fase experimental, se realiza un análisis estadístico para analizar la significancia de las variables tenidas en cuenta en las probetas fabricadas. Las variables explicativas son; a) relación agua/yeso (1; 0,8 y 0,7); b) tipo de residuo (ausencia de residuo (referencia), caucho, fieltro y caucho + fieltro); y c) cantidad de residuo (bajo (B), medio (M) y alto (A)) según Tabla 7. Con relación agua/yeso de valor 1 se han ensayado solamente probetas con valor medio de cantidad de residuo y tres replicaciones en cada caso: total 12 probetas. Con las otras relaciones se ha llevado a cabo el diseño factorial completo de las tres variables con tres replicaciones: total 72 probetas.

Las respuestas medidas en cada probeta han sido: resistencia a flexión (MPa); resistencia a compresión (MPa) y dureza SHORE (escala C). En cada caso se ha realizado un análisis de la varianza con tres factores (ANOVA) en el que se han estudiado los efectos principales de cada factor y las interacciones hasta tercer orden. Como resultado de cada análisis se ofrece, en el anejo 2 de resultados estadísticos correspondiente, la tabla completa ANOVA con la significación de cada factor, la desviación residual del modelo y el coeficiente de determinación R².

Además, se adjunta a cada análisis la correspondiente diagnosis de las hipótesis del modelo mediante un gráfico de residuos y un gráfico de cuantiles normales de los residuos.

El análisis se ha realizado con el software R de análisis de datos y generación de gráficos.

5.3. PLANTEAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE APLICACIONES CONSTRUCTIVAS EN EDIFICACIÓN, DESARROLLADAS CON LOS NUEVOS COMPUESTOS DE YESO ELABORADOS. (Fase 2.1)

Como se ha comentado anteriormente, la mayoría de las investigaciones en este campo de trabajo se centran en el desarrollo y caracterización de un material para construcción (pasta, mortero, etc.). Sin embargo, muy pocas culminan con la creación y caracterización de un producto para edificación. Así, de todas las propuestas constructivas planteadas para los nuevos materiales esta tesis opta por desarrollar placas para falsos techos discontinuos. Según la UNE-EN 14246 [129], esta se define como *“elemento de construcción fijado e instalado por debajo del forjado (elementos portantes) de un edificio o estructura con el fin de aportar determinadas características y prestaciones finales”* pudiendo ser continuas o discontinuas. Dicha placa pretende incorporar el residuo de pelotas de pádel/tenis testado en los apartados anteriores. Así, con el desarrollo de este prefabricado se reducirán los niveles de explotación de la materia prima, suponiendo una alternativa para mejorar la economía circular de los residuos de las pelotas de pádel/tenis disminuyendo la cantidad de residuos en el medioambiente.

Para desarrollar el producto planteado, se realizará un estudio teórico utilizando un programa de cálculo mediante elementos finitos y un proceso experimental posterior en laboratorio.

Ambos estudios se realizan sobre placas cuadradas de tipo desmontable A. Según la norma UNE-EN 14246 [129], estas placas tienen 600 mm de lado y 15 mm de espesor (continuo). Esta tesis desarrolla una placa de escayola para falsos techos.

Además, se realiza un estudio de resistencia al choque-impacto de las placas desarrolladas en el laboratorio.

5.3.1. Estudio teórico.

Antes de elaborar las placas de yeso para su ensayo a escala real en laboratorio se realiza un estudio teórico del comportamiento mecánico de las piezas mediante el programa SAP2000 v15. De esta forma se simplifica el trabajo en laboratorio, ya que los resultados obtenidos en el estudio verifican o no, a priori, la viabilidad de cada compuesto para soportar las exigencias establecidas en la normativa.

- *Definición del modelo*

Para modelizar la pieza se ha utilizado un programa de dibujo. En este caso se ha usado el programa AutoCAD, en el que empleando el comando 3DCARA se ha creado una matriz plana de elementos superficiales tipo Shell en la que queda definida las líneas de apoyo de la placa. Una vez definido el modelo se ha importado en el programa de cálculo SAP 2000 v15.

- *Procedimiento operatorio*

Primeramente, para llevar a cabo la simulación debe definirse el sistema de unidades con el que trabajar (S.I.) e importar, a continuación, el archivo.dxf elaborado previamente en AutoCAD. Seguidamente se definirán los siguientes parámetros:

- *Definición del material*

Los compuestos de yeso quedarán definidos en el programa mediante los valores (densidad y módulo de elasticidad longitudinal) obtenidos de la campaña experimental previa en el laboratorio de caracterización de dichos compuestos y que se ha desarrollado en la fase 1.2 del apartado 5.2 de esta tesis.

En el programa, se introducirán cada uno de los compuestos como material de tipo “Other” en los que se requiere, además del módulo E, sus densidades, el coeficiente de Poisson ($\nu = 0,05$) y el coeficiente de expansión térmica ($\alpha = 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), siendo estos dos últimos valores los mismos para todos los tipos de yeso a introducir. El material creado YESO, se irá modificando (E y densidad) a la vez que se realizan las comprobaciones con los diferentes compuestos.

Igualmente, será necesario definir las características geométricas de los elementos superficiales “Shell”, de las que destaca su espesor constante de 15 mm. Se crea para ello un grupo de elementos “Shell” que comparten las mismas características geométricas aquí definidas y el mismo material. Se le designa como PANEL.

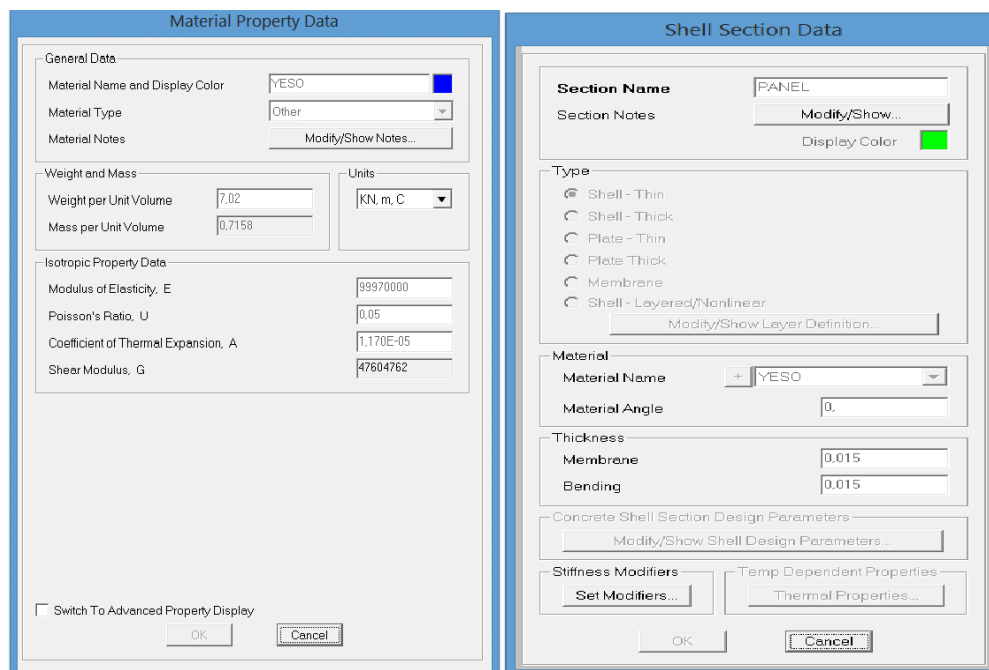


Figura 49: Definición de material YESO y elementos PANEL

➤ *Definición de los vínculos*

Para no convertir la placa en una estructura hiperestática, creando así tensiones irreales, se define una de las líneas vinculares como apoyo simple y la otra como articulación.

➤ *Aplicación de cargas*

Para determinar la resistencia a flexión de las piezas, la norma UNE-EN 14246 establece la aplicación de una carga lineal centrada de 6 kg (0,1 kN/ml). Así, se introduce una carga lineal de tipo permanente de valor 0,1 kN/ml, aplicada en la línea central de la placa, paralela a ambas líneas de apoyo tal y como se observa en la captura de la Figura 50.

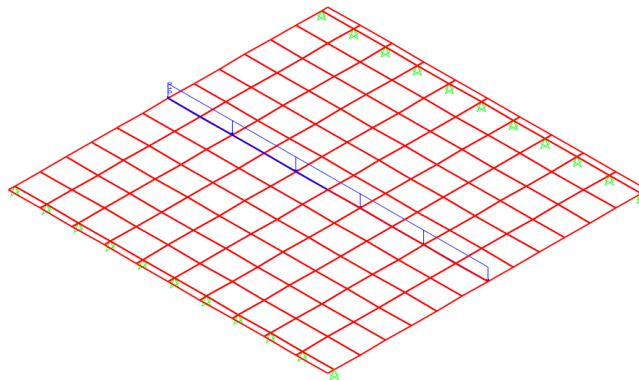


Figura 50: Definición de vínculos y cargas sobre las placas.

Por normativa, la placa debe soportar la carga aplicada durante 30 minutos sin sufrir daños.

➤ *Proceso de cálculo y expresión de resultados*

Una vez definidos los materiales y caracterizadas las placas en SAP2000, se procede a realizar el cálculo de las placas definidas con los diferentes compuestos elaborados.

Al igual que ocurre en hormigones y morteros, los compuestos de yeso poseen un mejor comportamiento a compresión que a tracción. Dicho esfuerzo se localizará en toda la cara inferior de la placa durante el ensayo de rotura a flexión. Al no existir un valor de resistencia a tracción para los diferentes compuestos (no existe ensayos normalizados para ello), tomaremos a modo de simplificación cualitativa un valor aproximado de un 10% de la resistencia a compresión del material en cuestión. De esta forma se consigue establecer una relación entre los resultados obtenidos del programa de elementos finitos y los valores de rotura dados por los ensayos de laboratorio.

$$\sigma_{\text{máx},TT} \approx 0,1 \cdot \sigma_{\text{máx},CC}$$

5.3.2. Plan experimental.

A la vista de los resultados obtenidos en el análisis teórico, se ejecutan series de placas reales de los compuestos escayola (CF) con el mayor porcentaje de residuo admisible según los resultados obtenidos del estudio. Además, se realiza una serie de placas con el material de yeso de referencia (sin ningún tipo de adiciones).

Según lo establecido por la norma UNE-EN 14246, cada una de las series o modelo (materiales) estudiado se compone de tres placas, las cuales deben ser sometidas al ensayo de resistencia a flexión descrito en el apartado 5.3.1.

➤ Elaboración de las placas

Para fabricar las placas de ensayo se emplea un molde de madera cuadrado de 600 mm de lado en su parte interior y 15 mm de espesor, tal como se define en la normativa (Figura 51). Este molde se coloca sobre una plancha de acetato sobre la que se vuelca la mezcla. Para facilitar el desmolde de las piezas se dispone desencofrante por todas las paredes del molde y por el acetato. Dichos ensayos se realizan en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.



Figura 51: Molde para la ejecución de placas de techo en laboratorio.

Una vez elaboradas las placas, se conservan durante siete días en una cámara de curado con las condiciones de laboratorio descritas en la norma. Después de esos siete días, las probetas se introducen en una estufa, durante 24 horas con una temperatura de $42\pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta peso constante y se someten a ensayo según norma.

➤ Ensayo a flexión de las placas

La normativa únicamente exige la verificación de placa tras soportar durante 30' una carga lineal uniforme en su fibra central de 6kg. Pese a ello, y con el objetivo de conocer la capacidad portante máxima de las mismas, tras realizar dicha comprobación, se procederá a obtener la carga de rotura máxima de cada una de las placas realizadas. Para ello se utiliza la máquina de ensayo modelo MPX-22 de PÁCAM, provista de dos soportes cilíndricos paralelos, dispuestos sobre una base nivelada y equidistantes al centro de la placa (Figura 52).

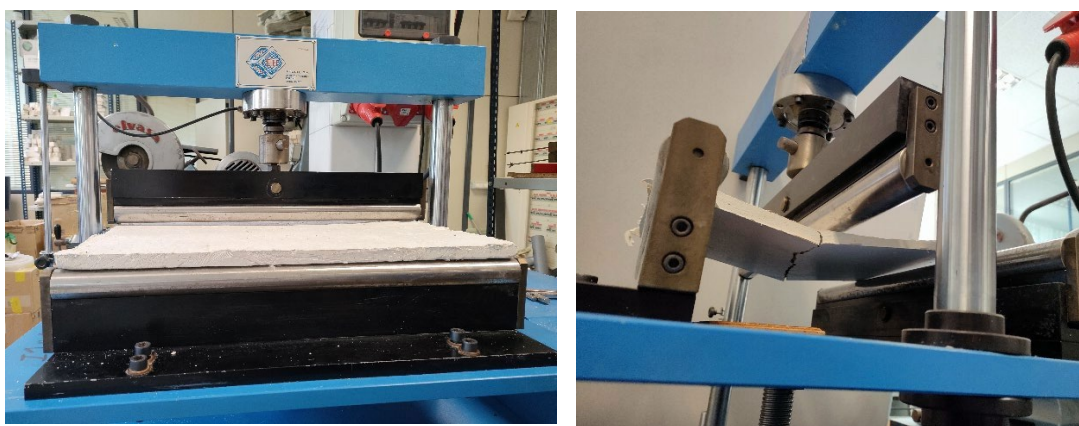


Figura 52: Ensayo de rotura a flexión de la placa en laboratorio.

5.3.3. Resistencia al choque-impacto de las placas.

La resistencia al choque de impacto se mide por la profundidad de huella determinada por la bola de acero después del impacto sobre cada probeta, según lo indicado en la norma UNE EN 520 (2010).

Para ello, sobre una superficie rígida se coloca la probeta con la cara hacia arriba., dejando caer sobre la misma una bola de acero, de 50 mm de diámetro y 510 ± 10 g de masa, a una altura de 500 ± 5 mm según Figura 53. A continuación: Se mide el diámetro de la huella dejada por el impacto con precisión de ± 1 mm como muestra la Figura 53 a).

Obteniendo los resultados de la media de tres determinaciones, según la expresión:

$$h = \frac{D^2 - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

donde,

h= profundidad de la huella después de impacto en mm.

D= diámetro de la bola de acero en mm.

d= diámetro de la huella después de impacto en mm.

Este ensayo se ha realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.



a)



b)



c)

Figura 53: Ensayo de resistencia al choque-impacto: a) Material de ensayo, b) Medición de profundidad huella y c) Impacto en muestra de referencia.

5.4. EVALUACIÓN DEL BENEFICIO ENERGÉTICO Y MEDIOAMBIENTAL DE LOS COMPUESTOS (Fase 2.2).

En este apartado se evalúa el beneficio energético y medioambiental de incorporar los residuos de pelotas de pádel/tenis en los nuevos materiales desarrollados.

5.4.1. Potencial de eficiencia energética

A continuación, se incluye la evaluación energética de la placa de yeso con residuos de pelotas de pádel/tenis, con la composición 05-CF-A+ (residuo Caucho Fieltro, el que mejores propiedades de aislamiento térmico aporta con un 25% de residuo), frente a la placa de yeso sin residuo. Adicionalmente, como se verá más adelante se han evaluado el potencial de sustituir los ladrillos cerámicos doble hueco tradicionales por bloque de yeso con material compuesto CF y, por otro lado, los paneles de yeso laminado por guarnecidos y enlucidos de material compuesto CF.

Para ello, se ha desarrollado un modelo de simulación energética en el programa Design Builder con un edificio representativo del modelo constructivo en España. Es el modelo se incorporan soluciones tradicionales de yeso y soluciones de yeso con residuos con el fin de comparar el potencial de eficiencia energética del nuevo panel reciclado.

A modo de resumen la metodología seguida ha consistido en:

- Identificación del modelo constructivo más habitual en España
 - Características del edificio de referencia
 - Características del modelo de simulación energética
 - Sustitución de material tradicional por compuesto de mayor eficiencia energética analizado.
-
- Identificación del modelo constructivo más habitual en España

Para identificar el modelo constructivo más representativo es necesario realizar un análisis de los datos estadísticos publicados. Para ello, en primer lugar, se analizó el censo de población y viviendas del Instituto Nacional de Estadística (INE), aunque se comprobó

que la información que aporta es insuficiente, ya que no existen datos relacionados con las características y/o sistemas constructivos del actual parque de viviendas en España [130].

Por este motivo, se ha decidido acudir al Anuario Estadístico 2018 [131] y el informe de Estadística de Construcción de Edificios 2015-2019 [132].

Ambos documentos, editados por el Ministerio de Fomento, ofrecen datos en función de las licencias municipales concedidas y recopilan la información estadística más relevante de la actividad de construcción dedicada a la edificación, en las modalidades de: edificación de nueva planta, rehabilitación de edificios y demolición total o parcial de edificios, y de la evolución y características del parque de edificios a nivel nacional. Esta documentación no tiene las carencias mencionadas anteriormente y permite conocer los modelos constructivos más utilizados.

Los siguientes porcentajes se han obtenido con las tablas estadísticas referentes a la última década [131]. Los datos recogidos muestran que las obras de construcción de nueva planta son superiores a aquellas de rehabilitación o demolición. Además, entre los edificios construidos de nueva planta se observa que los edificios residenciales representan un 80% frente al 20% de los edificios no residenciales. Por ello, se justifica centrar el análisis energético sobre un edificio residencial de nueva planta. En general, los edificios de nueva planta de uso residencial presentan una superficie media alrededor de 110 m² en edificios en bloque. En cuanto al número de plantas sobre y bajo rasante, las estadísticas muestran que existe un mayor porcentaje de edificios construidos con cuatro o más plantas sobre rasante (56%) y con ninguna o una planta bajo rasante (66%).

Los siguientes porcentajes se han obtenido con las tablas estadísticas referente al año 2019 de los edificios de nueva planta de uso residencial [132]. En Las características constructivas más relevantes para viviendas de nueva planta y de uso residencial, se clasifican según los siguientes elementos: estructura (vertical/horizontal), cubierta (plana/inclinada), cerramiento y carpintería exterior. Se puede afirmar que la estructura vertical más habitual es la de hormigón armado (87%) y la estructura horizontal consiste en forjados unidireccionales siendo la diferencia entre esta y otro tipo de estructuras ínfima (50,12%).

En cuanto a las cubiertas son más empleadas las planas (81%), sin embargo, esta es una de las características que dependen de la Comunidad Autónoma. En el cerramiento exterior predomina el revestimiento continuo (42%). La carpintería exterior es de aluminio en el 73% de los casos.

Analizando los datos sobre las instalaciones de climatización interior, los edificios de uso residencial incluyen calefacción en un 15% mientras que la refrigeración un 11%. En cuanto al acabado interior de las viviendas, se observa que el pavimento más colocado es el cerámico (57%) y la madera (34%). La mayor parte de viviendas tiene falso techo (92%).

A partir de la información recopilada anteriormente se han definido características generales del edificio de referencia:

- Edificio de nueva planta de uso residencial.
 - Superficie media por vivienda de 110 m².
 - Cuatro plantas sobre rasante y ninguna bajo rasante.
 - Estructura vertical de hormigón armado y estructura horizontal con forjado unidireccional.
 - Cubierta plana, cerramiento exterior con revestimiento continuo y pavimento interior cerámico.
 - Falso techo.
 - Sistema de Refrigeración y Calefacción.
-
- Características del edificio

El edificio de referencia está formado por cuatro plantas con una altura libre de 2.7 m cada una y no existen plantas bajo el nivel de rasante. Cada planta se compone de seis viviendas iguales de 110 m² cada una, resultando en una superficie útil total de 2640 m² en el edificio. La superficie total de fachada es de 1484 m² mientras que la superficie de acristalamiento es de 287 m² (20% de la total). Teniendo en cuenta los objetivos del estudio, la geometría del edificio se ha simplificado considerablemente, obviando los espacios dedicados a locales comerciales, sótanos, salas de calderas o trasteros.

Igualmente, se considera que cada vivienda posee condiciones ambientales constantes por lo que no ha sido necesario dibujar particiones interiores o puertas. La Figura 54 muestra el edificio de referencia, así como la distribución de las viviendas en cada planta.

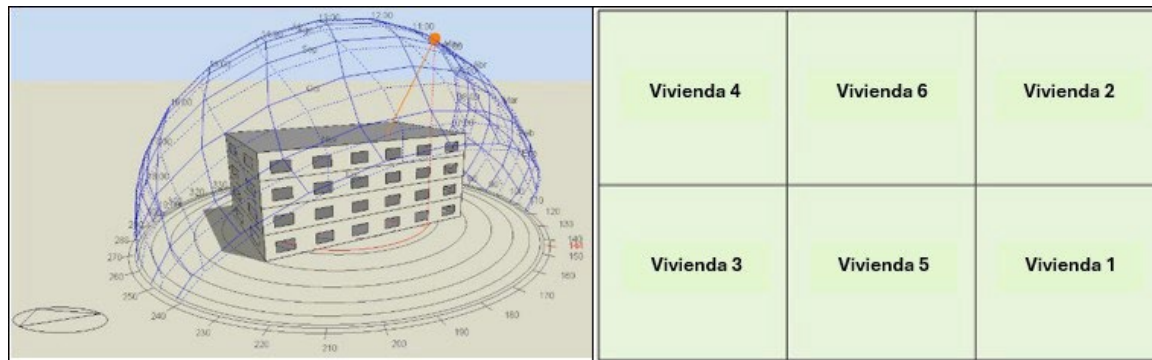


Figura 54: Edificio de referencia y distribución de las viviendas

A continuación, se definen los sistemas constructivos y los materiales que forman la envolvente del edificio de referencia según lo establecido en el actual código constructivo español [133] y el modelo constructivo habitual existente en España. Uno de los puntos más importantes para que quede bien definida la caracterización térmica de la envolvente del edificio es conocer su transmitancia térmica (U-valor).

Las siguientes tablas incluyen el tipo de material empleado para cada una de las partes de la envolvente en contacto con el exterior: fachada, suelo horizontal inferior y cubierta plana transitable. Las características de los materiales (espesor, densidad y conductividad térmica) han sido obtenidas según información publicada por el Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción con la colaboración de CEPCO y AICIA [134]. En los casos en que la capa de un elemento constructivo tiene un espesor variable (ej. Hormigón de pendiente en la cubierta plana) se ha considerado un espesor medio en el modelo de simulación. El edificio se ha ubicado y simulado en un clima frío (Soria) y uno cálido (Sevilla). Con estas dos ciudades, se abarca gran parte de los diferentes climas que hay en España.

En la Tabla 10 y Tabla se detallan los materiales empleados en cerramiento de fachada y la azotea del edificio de referencia, junto con los datos necesarios para las simulaciones (espesor, densidad y conductividad).

	Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m·K)	Espesor (m)	
				Sevilla	Soria
	Mortero de cemento mono-capa	1900	1,300	0,015	0,015
	Ladrillo cerámico perforado	900	0,500	0,115	0,115
	Enfoscado. de mortero de cemento	1700	1,000	0,010	0,010
	Cámara de aire no ventilada	1,2	0,220	0,040	0,040
	Lana mineral	45	0,022	0,030	0,050
TRA	Ladrillo hueco doble	900	0,500	0,100	0,100
TRA	Placa de yeso laminado	900	0,300	0,015	0,015
CF25	Bloque de yeso + 25% CF	-	0,170	0,100	0,100
CF25	Guarnecido y enlucido. de yeso + 25% CF	-	0,170	0,015	0,015

Tabla 10. Características de sistema constructivo de cerramiento de fachada.

Se ha resaltado en color verde el material tradicional correspondiente a cada cerramiento que se va a cambiar por material compuesto de yeso con residuos (color naranja) en las simulaciones posteriores para comparar los resultados obtenidos, tal y como se explica en el subapartado “sustitución de material tradicional por el compuesto de mayor eficiencia energética analizado”.

Del suelo en contacto con el terreno no realizaremos ningún cambio, pero al ser importantes sus transmitancias por afectarnos a los valores que obtendremos en las simulaciones, es importante mencionar su composición. Este estará compuesto por las siguientes capas: solado cerámico, mortero de cemento, poliestireno extruido, forjado unidireccional y cámara de aire ventilada. Las transmitancias obtenidas son de 0,75 W/m²K en Sevilla y 0,61 W/m²K en Soria.

	Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m·K)	Espesor (m)	
				Sevilla	Soria
	Solado cerámico	2400	1,9	0,01	0,01
	Mortero de cemento de agarre	1700	1	0,01	0,01
	Mortero de cemento	1700	1	0,03	0,03
	Poliestireno extruido (XPS)	35	0,034	0,04	0,055
	Lamina bituminosa	2100	0,7	0,01	0,01
	Mortero aligerado de pte. con arcilla expandida	700	0,22	0,12	0,12
	Forjado unidireccional de hormigón	1110	0,9375	0,30	0,30
	Cámara de aire no ventilada	1.2	0,56	0,15	0,15
TRA	Placa de yeso laminado	900	0,3	0,015	0,015
CF25	Guarn. y enluc. de yeso + 25% CF	-	0,17	0,015	0,015

Tabla 11. Características de sistema constructivo de cubierta plana transitable.

La transmitancia térmica de los sistemas constructivos de envolvente del edificio de referencia cumple los requisitos normativos establecidos en el Código Técnico de la Edificación [133] donde se fijan los siguientes valores máximos de los parámetros característicos de la envolvente térmica para el pre-dimensionado de soluciones constructivas en uso residencial: Sevilla (fachada $0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$; suelo $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$; cubierta $0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$) y Soria (fachada $0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$; suelo $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$; cubierta $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Los huecos de la fachada poseen una transmitancia térmica (U-value) de $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ en el edificio ubicado en Sevilla, cumpliéndose el valor establecido en el CTE ($2,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) y de $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ en el edificio ubicado en Soria, cumpliéndose así el valor establecido en el CTE ($1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$), mientras que la g, el factor solar, es de 0,7. Este factor solar corresponde a la energía absorbida por el vidrio más la energía que atraviesa la ventana, o sea, la transmisividad más la absorptividad.

- *Características del modelo de simulación energética*

El programa de simulación energética EnergyPlus™ es la herramienta oficial de simulación de edificios del Departamento de Energía de los Estados Unidos [135] y es ampliamente utilizada por la comunidad internacional de investigación para modelar la calefacción, la refrigeración, la ventilación y la iluminación [136], [137], [138]. El principal inconveniente que presenta EnergyPlus™ es que su interfaz es poco amigable y su uso en ocasiones se limita a profesionales experimentados con altos conocimientos específicos en la herramienta. En este sentido, DesignBuilder™ es la interfaz de usuario más establecida y avanzada para EnergyPlus™ [139]. Por tanto, con el fin de simplificar el proceso de modelado, la presente investigación se realizará con DesignBuiler™.

Para estimar la demanda de calefacción y refrigeración del edificio, la base de datos climática del programa incluye todas las variables necesarias. Las ganancias solares por radiación del edificio se producen a través de las cuatro fachadas del edificio ya que no existen edificios colindantes que produzcan sombras en el edificio. Del mismo modo, no se han considerado elementos constructivos de sombreado (ej. parasoles) para la reducción de las ganancias solares. La climatización (HVAC) se modela mediante un sistema “ideal” que suministra la energía y los caudales de ventilación necesarios para mantener el confort en el edificio.

Esto significa que los sistemas operan considerando que tienen una capacidad ilimitada, logrando satisfacer cualquier demanda de refrigeración o calefacción, así como mantener las temperaturas de consigna. Este enfoque sistemático ofrece la posibilidad de evaluar la eficiencia energética de diferentes estrategias de envolvente de manera sencilla.

En concreto, el sistema de refrigeración utiliza electricidad como combustible. El sistema opera únicamente entre los meses de junio a septiembre. En ese periodo, el sistema de 7-15h no funciona, de 15-23h funciona con una temperatura de consigna de 25°C y de 23-7h funciona con temperatura de consigna 27°C. Respecto al sistema de calefacción el combustible es el gas natural. El espacio se considera calefactado mediante un sistema de aire y se controla con base en la consigna de temperatura de calefacción. El sistema opera todo el año excepto los meses de junio a septiembre. El sistema, de 23-7h funciona con una temperatura de consigna de 20°C y de 7-23h funciona con temperatura de consigna 17°C.

La ventilación mecánica se modela de manera independiente al sistema principal de HVAC. El sistema mantiene una tasa de aire de 0,63 renov/h constante durante todo el año excepto los meses de junio a septiembre. En estos meses el sistema únicamente realiza la renovación de aire de 8-24h. Por otro lado, la ventilación natural mantiene una tasa de aire de 4 renov/h desde las 24-8h debido a que las ventanas permanecen abiertas por la noche. Los caudales de infiltración se calculan a partir del valor introducido para el edificio entero, empleando las ecuaciones descritas en la norma EN 12831 y tomando en cuenta las superficies expuestas en cada zona, la altura del edificio, el nivel de exposición al viento y las unidades de infiltración seleccionadas en las opciones del modelo.

Todos los detalles y ajustes utilizados se pueden consultar en el artículo publicado previamente por Porrás-Amores et al [140]. Respecto a la investigación mencionada anteriormente, cabe destacar que la composición de la fachada del edificio ha sido ligeramente modificada, como se ha mostrado anteriormente.

- Sustitución de material tradicional por el compuesto de mayor eficiencia energética analizado.

Una vez identificado un modelo constructivo en España, definidas las características constructivas del “caso de estudio”, y desarrollado el modelo de simulación energética, se ha procedido a seleccionar el compuesto de yeso con residuo de tenis/padel entre los estudiados en apartado anteriores.

Más concretamente, se ha seleccionado el compuesto de yeso con residuo (con un 25% (A+) de residuo de caucho fieltro) de menor coeficiente de conductividad térmica (identificado en los ensayos experimentales), y se ha sustituido por los siguientes los materiales tradicionales definidos en las Tabla 10 y Tabla 11:

- En el cerramiento, el ladrillo cerámico y la placa de yeso laminado se ha sustituido por un bloque de yeso con residuo y un guarnecido y enlucido de yeso con residuo respectivamente, de similar espesor al fijado previamente.
- En la azotea, la placa de yeso laminado se ha sustituido por un guarnecido y enlucido de yeso con residuo de similar espesor al fijado previamente.

5.4.2. Beneficio medioambiental de las nuevas placas de falso techo desarrolladas: ACV

Para evaluar el impacto ambiental de cada placa con residuos de CF, se realizó un estudio ambiental simplificado y comparativo mediante el método de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) centrado en la producción de una unidad de placa. El impacto ambiental (desde la cuna hasta la puerta) se evaluó en términos de Energía Incorporada (EE), expresada en MJ, y Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kg CO₂ eq., utilizando la metodología descrita en la Norma UNE-EN 14040 (2007).

Para esta evaluación se utilizó Simapro 8 para el procesamiento de los datos. Igualmente, se usó Ecoinvent v3 e ITEC (2018) como bases de datos de ACV.

Así, el impacto ambiental de cada placa se obtuvo de la siguiente manera:

- Identificación y cuantificación de los diferentes materiales utilizados para el desarrollo de las nuevas placas, procesos de fabricación, transporte y construcción.
- Aplicación de la metodología ACV para obtener el impacto ambiental de cada placa.
- Mediante este procedimiento se determinó el compuesto que implica menor impacto en las diferentes etapas del ACV.

RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN:

CAPÍTULO 06

CAPITULO 6: RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN (OBJ 1)

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología para alcanzar el primer objetivo específico: “Estudiar los efectos producidos por la adición de residuos de pelotas de pádel/tenis en compuestos de yeso para construcción”.

Fase 1.1: Caracterización la materia prima: yeso y residuos de pelotas de pádel/tenis.

Fase 1.2: Caracterización del compuesto de yeso con residuos de pelotas de pádel/tenis.

6.1 MATERIAS PRIMAS (Fase 1.1)

Una vez finalizada la fase 1 del proceso experimental consistente en la caracterización física, mineralógica y química se han determinado las propiedades de la materia prima según se describe a continuación

6.1.1 Ensayos Físicos

➤ Granulometría de los residuos

Una vez tamizados los diferentes residuos (caucho (C), fieltro (F) y caucho+fieltro (CF), se obtienen los pesos en gramos retenidos en cada tamiz y el porcentaje de residuo que pasa por cada uno de ellos según Tabla 12.

TAMIZ (mm)	CAUCHO				FIELTRO				CAUCHO+FIELTRO			
	PESO RET (g)	PESO R y A (g)	% R y A	% Pasa	PESO RET (g)	PESO R y A (g)	% R y A	% Pasa	PESO RET (g)	PESO R y A (g)	% R y A	% Pasa
16	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
8	128,10	128,10	12,81	87,19	102,03	102,03	10,20	89,80	80,10	80,10	8,01	91,99
6	267,09	395,19	39,53	60,47	365,26	467,29	46,73	53,27	363,57	443,67	44,38	55,62
4	270,14	665,33	66,55	33,45	235,17	702,46	70,25	29,75	270,14	713,81	71,40	28,60
2	226,45	891,78	89,20	10,80	155,32	857,78	85,78	14,22	148,57	862,38	86,27	13,73
1	75,01	966,79	96,70	3,30	88,32	946,10	94,62	5,38	76,50	938,88	93,92	6,08
Fondo	33,00	999,79	100,00	0,00	53,83	1000	100,00	0,00	60,80	1000	100,00	0,00
Suma	1000				1000				1000			

Tabla 12: Análisis granulométrico de los residuos.

En vista de los datos obtenidos y trazadas las curvas granulométricas (Figura 55) se aprecia que alrededor de un 70 % del tamaño de los residuos más abundantes son los que se encuentran entre los tamices de 4-6mm siendo independiente el tipo de residuo.

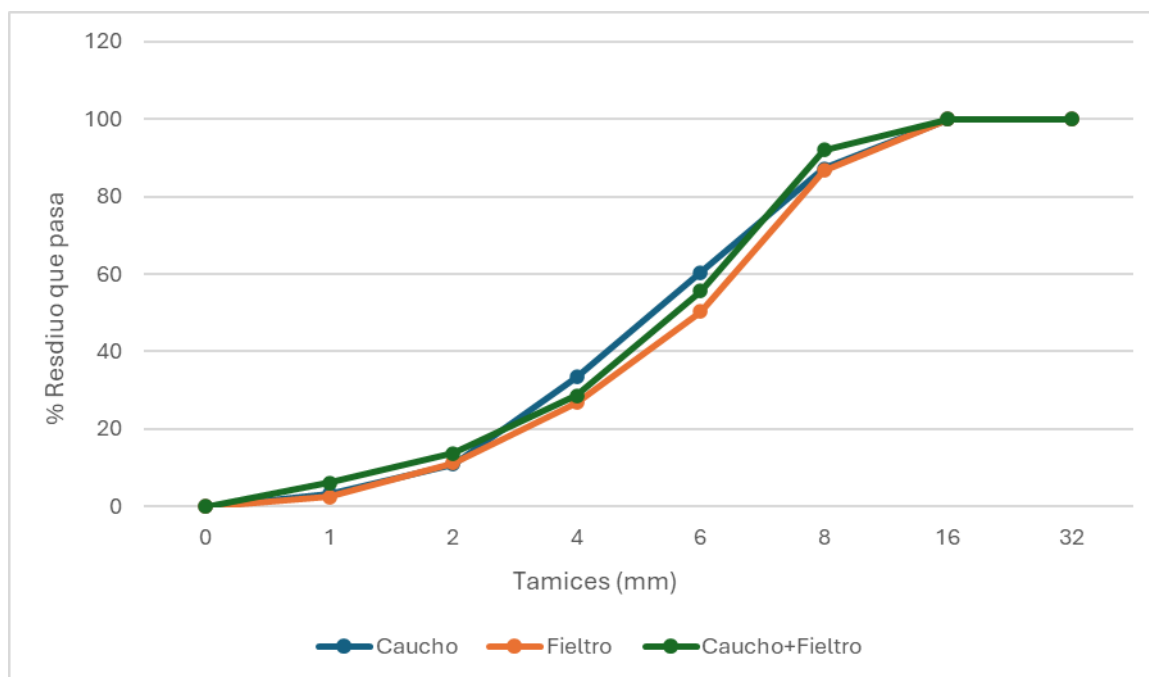


Figura 55. Curvas granulométricas de los residuos

6.1.2 Análisis Mineralógico

➤ Difracción de Rayos X

Los resultados obtenidos en el ensayo de difracción de Rayos X para la escayola se indican a continuación. En el difractograma se aprecia que la fase mineralógica predominante es el sulfato de calcio semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$).

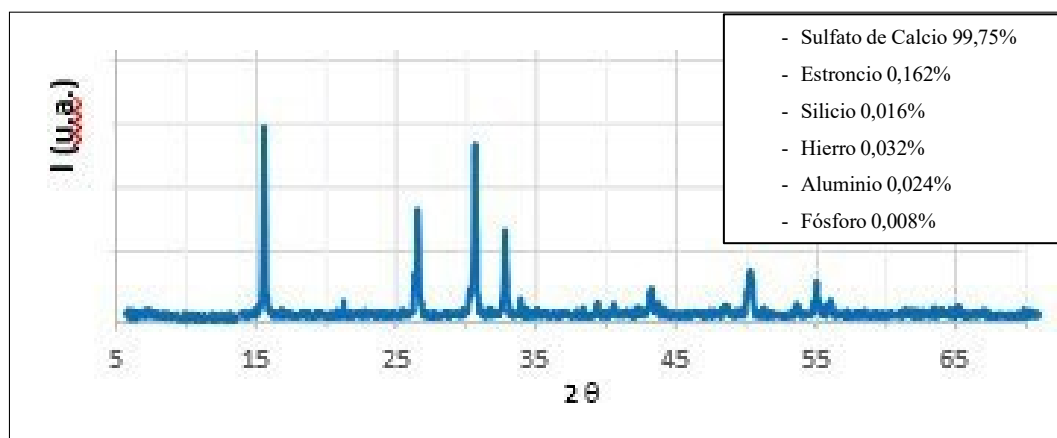


Figura 56. Difractograma de Rayos X de la escayola.

➤ Microscopía de barrido (SEM)

Tal y como muestra la Figura 57 a. El residuo de caucho presenta una estructura laminar, formando una masa poco porosa. Por otro lado, el residuo de fibra (Figura 57 b), presenta una estructura fibrosa con filamentos distribuidos uniformemente en cuanto a forma y tamaño, que se entrelaza entre sí, formando un material resistente. Finalmente, en el SEM del conjunto se puede observar según Figura 57 c, que los filamentos del residuo de la fibra se traban a la perfección con el caucho, formando un compuesto homogéneo y compacto.

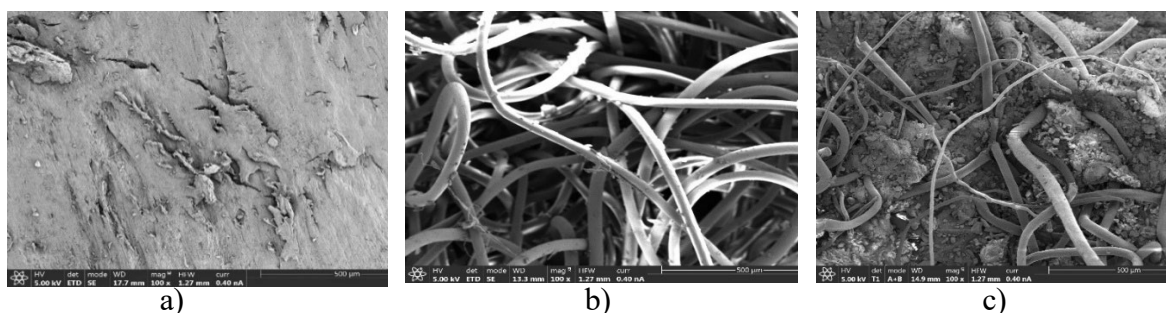


Figura 57. Microscopía de los residuos a 100x: a) caucho, b) fieltro, c) caucho +fieltro.

6.2 COMPUESTOS DE YESO (Fase 1.2)

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos expuestos en el apartado 5.2.2 y 5.2.3 para caracterizar los compuestos de yeso con los diferentes residuos de las pelotas de pádel/tenis.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos en la fase experimental de la fase 1 y 2 que corresponden con los *ensayos estado fresco* de los compuestos.

6.2.2 Ensayos plan experimental 1ª Parte.

➤ Consistencia de la pasta

Como se observa en el cuadro adjunto Tabla 13 las consistencias de las pastas de los nuevos compuestos con relaciones de agua/yeso del 1;0,8 y en algunos casos de 0,7 no cumplen con las exigencias mínimas establecidas para los yesos premezclados UNE EN 13279:2 [120], con relaciones más bajas de w/y se consiguen mezclas trabajables y dentro de los límites (165±5mm) establecidos por la norma. En cuanto al porcentaje del residuo, según añadimos más cantidad de adición al compuesto, la consistencia de la mezcla es mayor, al igual que pasa con el tipo de residuo. El fieltro hace que las mezclas tengan

consistencias superiores, siendo imposible la trabajabilidad de este residuo con w/y por debajo de 0,7. Mientras que el caucho y el caucho + fieltro se comportan de manera similar. Obteniendo con las mezclas de w/y 0,5, tipo de residuo de CF y porcentajes del B al A+% las consistencias más cercanas a las establecidas por la norma.

SERIES	DESIGNACIÓN	RELACION AGUA/YESO	RESIDUO	ESCURRIMIENTO (mm)
#0	Ref. 1	1		-
	Ref. 0,8	0,8	Yeso	271
	Ref. 0,7	0,7		195
#1	1-C-M	1		-
	0,8-C-B			239
	0,8-C-M	0,8		200
	0,8-C-A		Caucho (C)	196
	0,7-C-B			197
	0,7-C-M	0,7		190
#2	0,7-C-A			190
	1-CF-M	1		-
	0,8-CF-B			233
	0,8-CF-M	0,8		215
	0,8-CF-A		Caucho + Fieltro (CF)	192
	0,7-CF-B			193
#3	0,7-CF-M	0,7		186
	0,7-CF-A			180
	1-F-M	1		278
	0,8-F-B			216
	0,8-F-M	0,8		205
	0,8-F-A		Fieltro (F)	197
#4	0,7-F-B			189
	0,7-F-M	0,7		170
	0,7-F-A			182
	Ref. 0,5	0,5		170
#5	Ref. 0,6	0,6	Yeso	180
	0,6-CF-B			181
	0,6-CF-M			179
	0,6-CF-A	0,6	Caucho+fieltro	180
#5	0,6-CF-A+			171
	0,5-CF-B			172
	0,5-CF-M			168
	0,5-CF-A	0,5	Caucho+fieltro	163
	0,5-CF-A+			158

Tabla 13. Resultado de la mesa de sacudidas UNE EN 13279-2.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de dichas fases para los *compuestos en estado endurecido*.

➤ Densidad

Uno de los factores que más influye en la densidad de los compuestos es la relación w/y (Figura 58). Los compuestos son más ligeros cuando dichas relaciones son más altas, al igual que se puede observar en la investigación de [70]. Por otro lado, el tipo de residuo es insignificante en cuanto a la densidad del compuesto. Pero sí que cuando se añade más cantidad de residuo, los compuestos en la mayoría de los casos son más ligero. Siendo la mezcla más ligera la formada por yeso y fieltro (1-F-B) con una densidad 0,72 g/cm³.

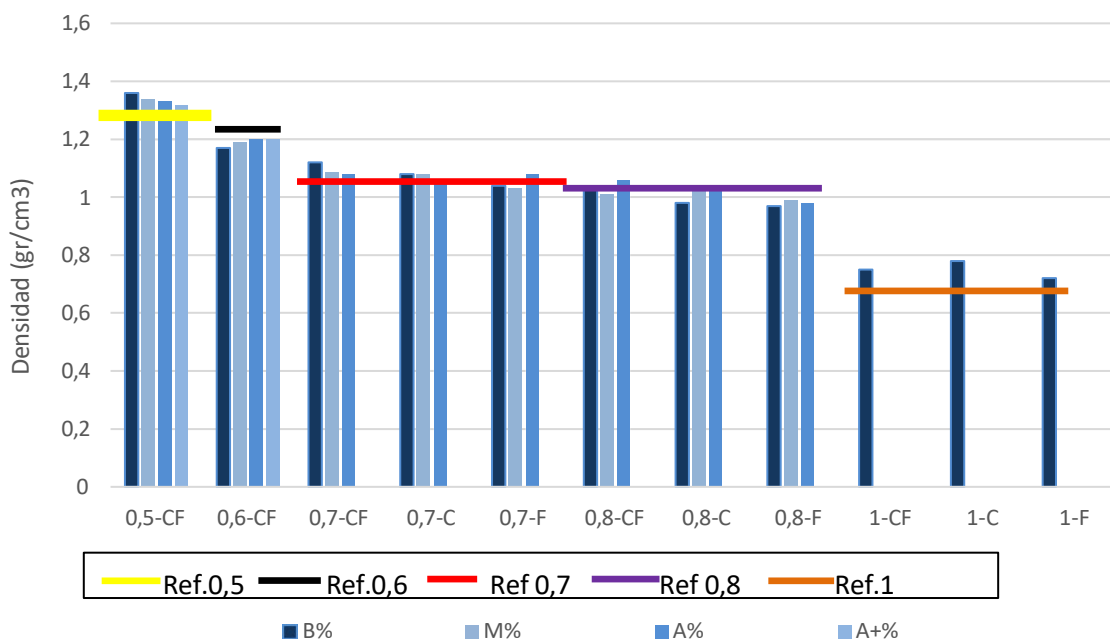


Figura 58.: Determinación de la densidad con diferentes relaciones w/y, tipo de residuo y % de adición.

➤ Dureza superficial, SHORE C.

En la Figura 59 queda reflejado los valores obtenidos de la dureza superficial de las mezclas.

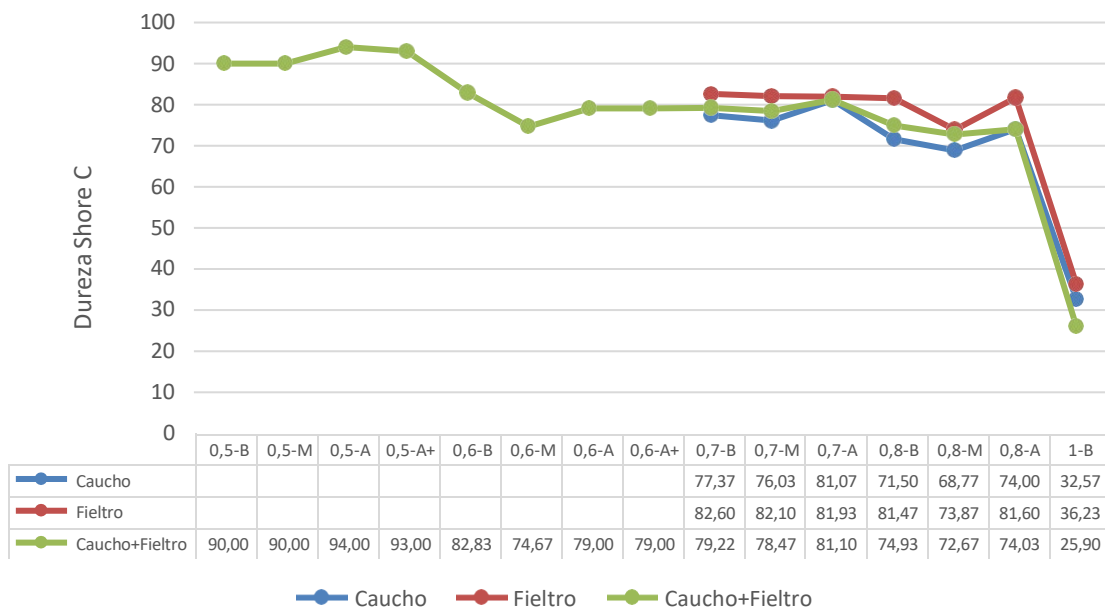


Figura 59.: Dureza SHORE C de los compuestos

Como cabe esperar, los compuestos más ligeros hallados en el apartado anterior son las mezclas de dureza shore C más pequeña. Esto es debido a que las mezclas con relaciones w/y menores son las más duras superficialmente y que el tipo de residuo y el porcentaje son parámetros que se comportan de manera similar en los tres casos. Viendo que con un mayor % de residuo las durezas superficiales en general aumentan. Obteniendo el mayor resultado 94 dureza Shore en la mezcla (0,5-CF-A) y resultando ser el compuesto con menor dureza 25,9 el (1-CF-B).

➤ Resistencia a flexión y a compresión

De los ensayos de flexión y compresión se han obtenido los siguientes resultados reflejados en la (Tabla 14).

SERIES	DESIGNACIÓN	(w/y)	Resistencia Flexión (N/mm ²)	Δ R. Flexión Respecto a la referencia	Resistencia Compresión (N/mm ²)	ΔR. Compresión Respecto a la referencia
#0	Ref. 1	1	1,74	0	3,51	0
	Ref. 0,8	0,8	4,32	0	8,70	0
	Ref. 0,7	0,7	5,06	0	10,87	0
#1	1-C-M	1	0,99	-43,10	1,59	-54,70
	0,8-C-B	0,8	2,82	-34,72	4,71	-45,86
	0,8-C-M		2,65	-38,65	4,02	-53,79
	0,8-C-A		2,22	-48,61	4,08	-53,79
	0,7-C-B	0,7	3,82	-24,50	6,23	-42,67
	0,7-C-M		2,92	-42,29	5,10	-53,08
	0,7-C-A		2,55	-49,60	4,67	-57,03
#2	1-CF-M	1	0,97	-44,25	1,26	-64,10
	0,8-CF-B	0,8	3,01	-30,32	6,24	-28,27
	0,8-CF-M		2,36	-45,37	4,92	-43,44
	0,8-CF-A		2,27	-47,45	4,94	-43,21
	0,7-CF-B	0,7	3,50	-30,83	7,13	-34,40
	0,7-CF-M		3,17	-37,35	6,39	-40,94
	0,7-CF-A		2,31	-54,34	5,67	-47,83
#3	1-F-M	1	1,32	-24,13	1,94	-44,72
	0,8-F-B	0,8	3,50	-18,98	8,28	-4,82
	0,8-F-M		3,16	-26,85	5,41	-37,81
	0,8-F-A		3,75	-13,19	7,24	-16,78
	0,7-F-B	0,7	4,43	-12,45	7,61	-29,99
	0,7-F-M		3,72	-26,48	7,33	-32,56
	0,7-F-A		5,04	-0,39	10,53	-3,12
#0'	Ref. 0,6	0,6	6,68	0	15,20	0
	Ref. 0,5	0,5	7,12	0	15,59	0
#4	0,6-CF-B	0,6	4,18	-37,42	6,46	-57,5
	0,6-CF-M		3,96	-40,71	6,08	-60,00
	0,6-CF-A		3,57	-46,55	5,84	-61,57
	0,6-CF-A+		3,17	-52,54	5,26	-65,39
#5	0,5-CF-B	0,5	6,71	-5,75	14,95	-4,10
	0,5-CF-M		6,14	-13,76	10,09	-35,10
	0,5-CF-A		4,94	-30,61	9,14	-41,37
	0,5-CF-A+		4,64	-34,83	9,27	-41,32

Tabla 14. Resistencias medias a flexión y compresión UNE-EN 13279.

La resistencia a flexión de los nuevos compuestos, al igual que ocurre con otras investigaciones de yeso con residuos de fibras y caucho (descritas en el capítulo 2) son inferiores a las de sus referencias sin adiciones. En general llegan a disminuir entorno al 40% cuando se trata del residuo de caucho o caucho + fieltro, en cambio con mezclas de fieltro y yeso la diferencia es menor, en torno al 15%. No obstante, todos los compuestos cumplen con el mínimo exigido por la norma UNE-EN 13279 [120] de 1 N/mm² (Tabla 14).

Cuanto mayor w/y la resistencia a flexión disminuye de manera gradual en relaciones intermedias del 0,5;0,6;0,7;0,8, siendo la caída de resistencia elevada en proporciones superiores, que hacen no utilizable el material.

El comportamiento en las diferentes combinaciones de tipo de residuo con distintas relaciones w/y se percibe que las resistencias son mayores cuando el residuo añadido es sólo fieltro, llegando a obtenerse una resistencia a flexión de 5,04 N/mm² con la mezcla (0,7-F-A), y en cuanto al % de residuo la resistencia a flexión es mayor cuando se emplea un % entre B y A %. Alcanzando los valores más altos con el compuesto 0,5-CF-B (6,71 N/mm²) según Figura 60.

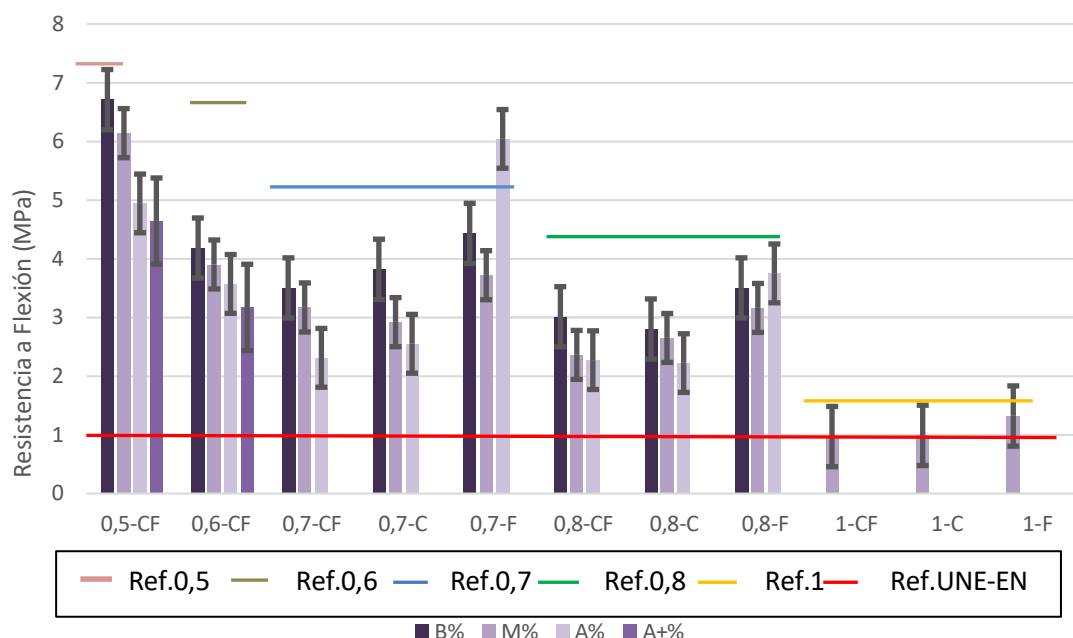


Figura 60: Resistencias medias a flexión UNE-EN 13279.

Por otro lado, al realizar la rotura de las probetas a flexión, se contempla que las probetas de referencia rompen completamente de forma transversal, mientras que las probetas con residuos quedan unidas, siendo esta unión más fuerte, en las probetas que contienen fieltro.

En cuanto a la resistencia a compresión, el comportamiento es muy similar al de la resistencia a flexión según Tabla 14.

Los compuestos con menores relaciones w/y obtienen mayores resultados de resistencia a compresión, desechando las relaciones de w/y= 1 ya que los valores registrados son inferiores a los establecidos por la norma UNE-EN 13279 [120] de 2 N/mm². Alcanzando el mayor valor la mezcla 0,5-CF-B con un 14,95 N/mm² y la de menor resistencia 4,02 N/mm² el compuesto 0,8-C-M, como se observa en la Figura 61 adjunta.

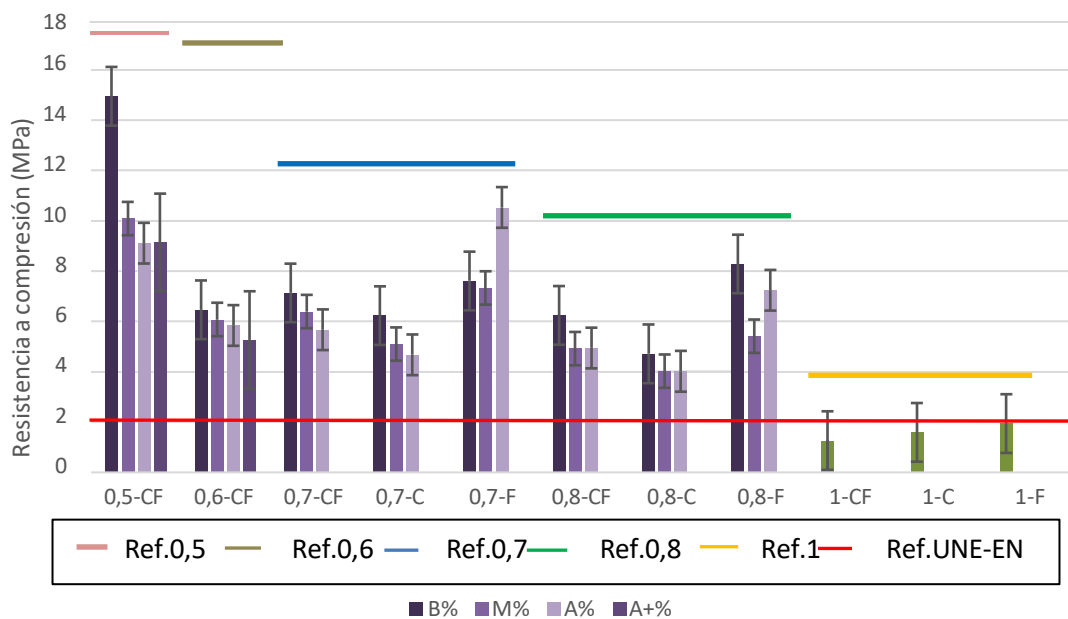


Figura 61: Resistencias medias a Compresión UNE-EN 13279

➤ Microscopía electrónica de barrido

El yeso (sulfato de calcio dihidratado) al fraguar lo hace en una cristalización en forma de láminas o agujas de longitudes no mayores a 10 micras, tal y como se puede observar en la Figura 62 a. En la microscopía de la mezcla del yeso con caucho (Figura 62 b) se observa que la adherencia entre los dos materiales no es buena, observándose una línea separadora entre la matriz y el residuo, produciéndose la rotura de la integridad del compuesto. De ahí la disminución de la resistencia a flexión y compresión de este compuesto frente al de referencia, estudiada anteriormente. Por otro lado, en la matriz del compuesto del yeso con el fieltro, según Figura 62 c, se observan puntos de unión con buena adherencia, obteniendo un material más compacto y resistente. En la Figura 62 d se muestra cómo las fibras sirven

de unión entre las discontinuidades producidas por el caucho y el fieltro, obteniéndose una matriz continua. Con estas imágenes se consigue justificar las tendencias obtenidas en los resultados de caracterización mecánica de las probetas.

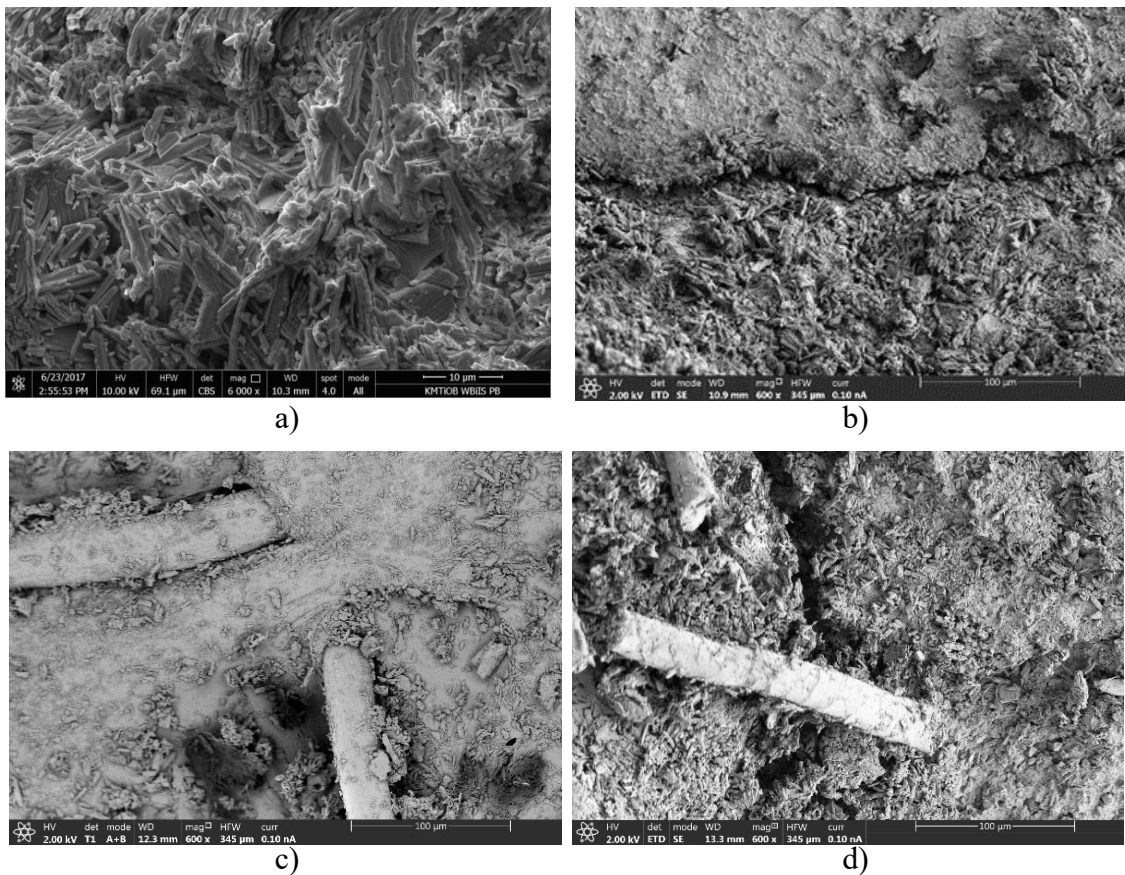


Figura 62: Microscopía de: a) yeso b) yeso-caucho 0,5-C-M, yeso- fibra 0,5-F-M, (d) yeso-caucho + fibra 0,5-CF-M

➤ Tomografía computarizada de rayos X (XCT)

Para la realización de la reconstrucción tomográfica del compuesto, se ha seleccionado el compuesto 0,5-CF-M, ya que se considera bastante representativo de esta serie de materiales (Figura 63). En él se observa una distribución homogénea de la porosidad y del residuo a lo largo de la pasta. Además, se confirma la buena adherencia existente entre las partículas de pelotas trituradas (CF) y la matriz de yeso.

Numéricamente, se puede concluir que la porosidad media del material es de un 0.97%, con un volumen máximo de poros de 9,37 mm³.

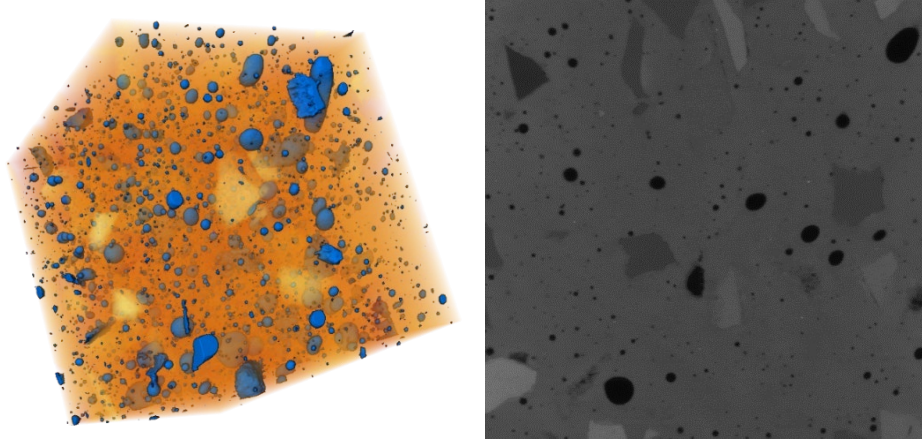


Figura 63: Reconstrucción 3D y sección transversal del compuesto 0,5-CF-M evaluado mediante XCT.

6.2.3 Análisis estadístico

Se ha aplicado un análisis de varianza a los valores de resistencia mecánica. Como podemos comprobar gráficamente según Figura 64 y Figura 65.

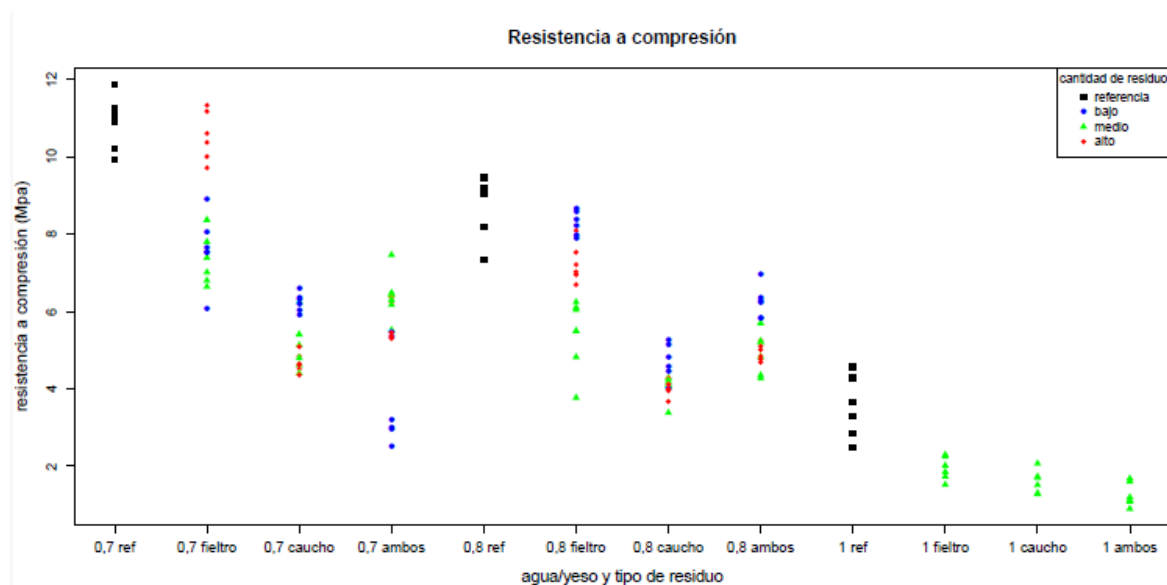


Figura 64: Resultados de Resistencia a compresión (ANOVA).

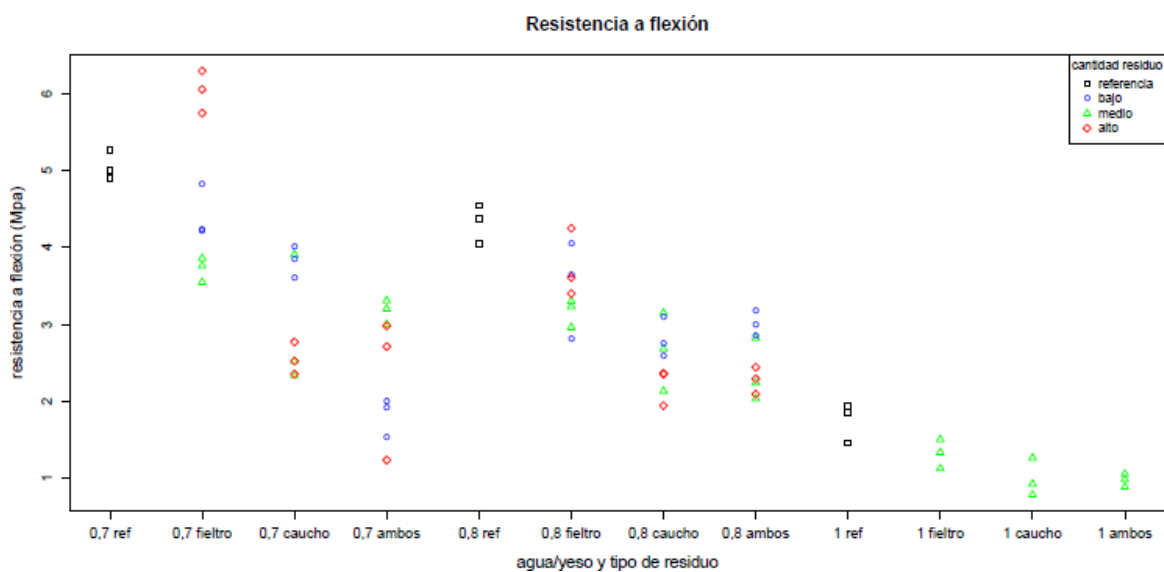


Figura 65: Resultados de Resistencia a flexión (ANOVA).

La Tabla 15 muestra numéricamente los resultados de este análisis. Mostrándose en términos de los grados de libertad; y el p-valor del F-test de cada uno de los tres componentes del modelo, así como sus interacciones.

Factor	Grados de Libertad		p-Valor del contraste F	
	Resistencia a flexión	Resistencia a compresión	Resistencia a flexión	Resistencia a compresión
Relación agua/yeso	3	3	0.0000	0.0000
Tipo de residuo	3	3	0.0000	0.0000
Cantidad de residuo	2	2	0.4893	0.0021
w/y + tipo de residuo	6	6	0.0000	0.0000
w/y + cantidad de residuo	2	2	0.0531	0.0000
tipo + cantidad de residuo	4	4	0.0000	0.0000
w/y + tipo + cantidad de residuo	4	4	0.0000	0.0000
Residuos (estadísticos)	48	120	---	---

Tabla 15. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) de la resistencia a la flexión y a la compresión.

Esta tabla proporciona el primer resultado de que todos los componentes son significativos para explicar las resistencias medidas (excepto la cantidad de residuos en la resistencia a la flexión), así como las interacciones entre ellas, (excepto la interacción de w/y con la cantidad de residuos).

En cuanto a la resistencia a flexión, el error estándar residual del modelo es 0,38 MPa, pequeño en relación con la media global de esta variable. El coeficiente ajustado R^2 es 0.9852, lo que muestra un modelo con una determinación muy alta.

En la resistencia a compresión, el error estándar residual del modelo es de 0,61 MPa, también un valor considerablemente pequeño. El coeficiente ajustado de R^2 es 0.9903, lo que muestra un ajuste extraordinario. Por lo tanto, los resultados son similares o mejores a los de la resistencia a la flexión.

Para estudiar la importancia relativa de cada componente del modelo (w/y, tipo de residuo y cantidad de residuo) tanto para la resistencia a la flexión como para la compresión, se analizaron los coeficientes del modelo. Estos coeficientes permiten predecir, dentro de los límites de los datos experimentales y dentro de los límites del error patrón residual, los valores de resistencia a la flexión/compresión en términos de la mezcla elegida. Los resultados se recogen en la Tabla 24 que se puede encontrar en el anejo 2, confirmando los resultados mostrados en las Figura 60 y Figura 61 que la relación de agua / yeso es el efecto más importante, particularmente con los valores 0,7 y 0,8, tanto en resistencia a la flexión como a la compresión. Los principales efectos del tipo de residuo y la cantidad de residuos fueron los segundos más importantes, pero con una contribución similar a las interacciones de primer y segundo orden entre ellos.

Se debe verificar la coherencia interna de los modelos anteriores, ya que el ANOVA y el modelo en él se basan en hipótesis estadísticas sobre datos como la independencia, la normalidad y la homocedasticidad. Ambos modelos cumplen con las hipótesis, por lo que los resultados podrían considerarse fiables. En el anejo 2, la Tabla 24 muestra y comenta un gráfico doble de residuos frente a valores ajustados y cuantiles de los residuos frente a cuantiles normales para cada uno de los dos modelos (resistencia a la flexión y a la compresión).

Además de las variables controladas en el laboratorio (relación agua/yeso, tipo de residuo y cantidad de residuo), las variables medidas (resistencias a la flexión/compresión, dureza superficial y densidad) se compararon entre ellas para identificar y cuantificar su interrelación.

6.2.2 Ensayos plan experimental 2ª Parte.

En vista de los resultados anteriores, y observando que los mejores resultados se obtienen con relaciones de $w/y=0,5$ y que el residuo más abundante y fácil de obtener de manera directa es el caucho-filtro, se decidió continuar el estudio de la caracterización de los compuestos descritos en el apartado 5.2.2 con sólo las mezclas de yeso y caucho-filtro y porcentajes 10,15,20 y 25% (B, M, A, A+) a través de los ensayos descritos a continuación.

Dentro de las buenas propiedades del yeso, se sabe que las resistencias mecánicas disminuyen según el grado de humedad. Llegando a ser casi la mitad de sus resistencias en estado seco cuando se encuentra con 1 % de humedad. Por ello, es imprescindible estudiar su comportamiento frente al agua.

Para ello se ha realizado un estudio previo de la retención de agua de los compuestos seleccionados, a partir de la elaboración dichas probetas. (Tabla 16).

DESIGNACIÓN	P.	P.	RETENCIÓN
	HUMEDO (g)	DESECADO (g)	DE AGUA (%)
REF.06	405,12	303,21	33,61
0,6-C-B	411,72	301,70	36,47
0,6-CF-M	409,84	306,07	33,90
0,6-CF-A	410,00	308,77	32,78
0,6-CF-A+	407,64	309,73	31,61
REF.05	433,33	338,2	28,13
0,5-CF-B	440,38	348,93	26,21
0,5-CF-M	434,46	344,13	26,25
0,5-CF-A	426,38	341,50	24,86
0,5-CF-A+	420,25	339,73	23,70

Tabla 16: Relación de pesos húmedos y secos.

La retención de agua está íntimamente ligada a la cantidad de yeso; por un lado, cuanto menos cantidad de yeso, la retención de agua es mayor, por otro lado, si aumentamos el % de residuo, se observa que en la mayoría de los casos la retención es menor, como ocurre en otras investigaciones de diferentes compuestos de yeso con caucho [59].

Esto puede ser debido a que la incorporación de residuos frena la entrada de partículas de agua en el compuesto. Siendo el compuesto con la menor retención de agua el 0.5-CF-A+ (23.70%), según Figura 66.

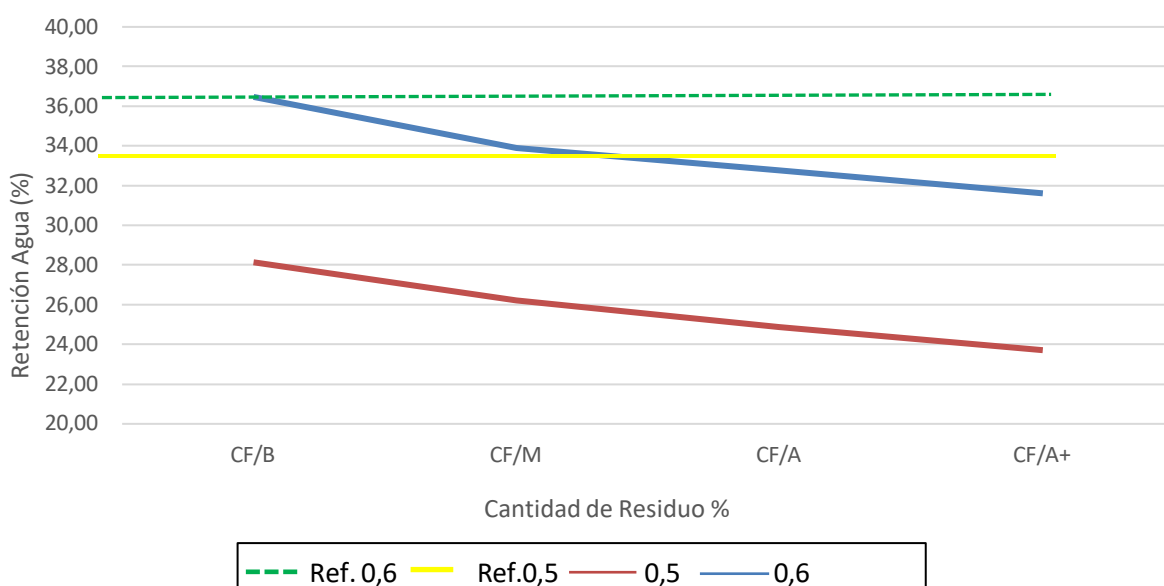


Figura 66: Capacidad de retención de agua.

➤ Absorción total de agua

Otro de los factores importantes a tener en cuenta de los materiales de construcción, es la absorción total de agua de los mismos, para determinadas ocasiones. A continuación, se muestran los resultados obtenidos (Figura 67) en el ensayo de absorción total de agua.

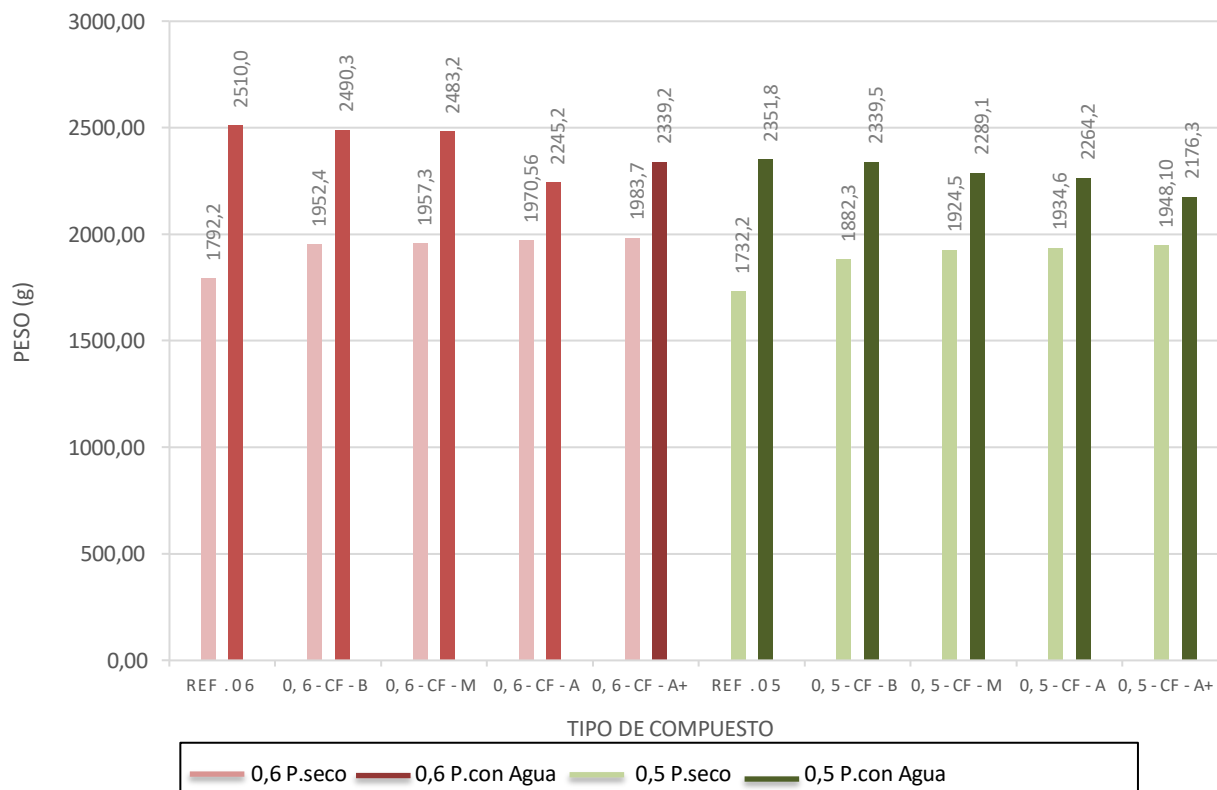


Figura 67: Resultados de Ensayo de absorción total de agua.

Según muestra la gráfica se puede observar que la w/y es un factor que interviene en la absorción del agua, aun estando los valores de los pesos secos próximos entre sí, una vez sometidas las muestras al ensayo se observa que los compuestos de w/y= 0,6 absorben más cantidad de agua que los que tienen menores relaciones de w/y.

Por otro lado, al aumentar la cantidad de residuo, en cualquiera de los dos casos, la absorción de agua disminuye. Alcanzando valores siempre por debajo de los de sus referencias. Siendo el compuesto 0,5-CF-A+ el que menos absorción presenta.

➤ Absorción de agua por capilaridad

El contacto de unidades constructivas del tipo de cerramientos, divisiones interiores y trasdosados con el terreno o con superficies húmedas, produce aumentos de humedad que comienzan por la parte inferior y se van desarrollando en altura por efecto de capilaridad.

Para conocer el comportamiento de los materiales que se emplean en esas circunstancias, se mide la capilaridad que muestra el ascenso del agua en mm medido cada minuto. Eligiendo las muestras con una $w/y= 0,5$ para su estudio. Los resultados obtenidos en cuanto a la absorción de agua por capilaridad se muestran en la siguiente Tabla 17.

DENOMINACIÓN	PESO SECO	MIN 1. (mm)	MIN 2. (mm)	MIN 3. (mm)	MIN 4. (mm)	MIN 5. (mm)	MIN 6. (mm)	MIN 7. (mm)	MIN 8. (mm)	MIN 9. (mm)	MIN 10. (mm)	TOTAL (mm)
REF.0,5	350,60	14,10	4,10	3,20	3,20	2,10	2,20	1,20	1,20	1,00	0,87	33,17
0,5-CF-B	344,10	12,03	4,20	4,20	2,50	2,00	1,97	1,95	1,10	0,98	0,33	31,26
0,5-CF-M	342,30	12,00	4,05	3,10	2,12	2,20	2,10	1,89	1,56	1,12	0,65	30,79
0,5-CF-A	339,28	11,98	5,30	4,15	2,98	1,78	2,05	1,18	1,00	0,78	0,45	30,89
0,5-CF-A+	340,20	10,05	5,50	4,20	3,25	1,85	1,75	1,21	0,98	0,20	0,10	29,09

Tabla 17: Resultados ensayo de capilaridad.

Se observa un mejor comportamiento frente a la capilaridad en las mezclas con residuo. La de menos capilaridad es la mezcla con el 25% (A+) de residuo, con pequeñas diferencias del resto de las mezclas, pero con un 12,3% menor respecto a la de referencia (ref 0,5) siendo $29,09 \text{ mm} < 33,17\text{mm}$. Estos resultados permiten concluir que la capilaridad disminuye con la presencia del residuo utilizado y mejora con mayor cantidad de residuo empleado.

➤ Cámara Húmeda

“La capacidad higroscópica de los materiales de revestimiento es importante por permitir la adsorción y desorción de agua en estado de vapor y así permitir la regulación de la humedad del ambiente interior” [141]. Como ya se comprobó en anteriores investigaciones [109] las resistencias mecánicas y dureza shore c de un yeso húmedo, disminuyen respecto a un yeso en estado seco. Por ello en la Tabla 18 y Figura 68, se muestran los datos obtenidos de retención de agua, la dureza shore C, resistencia a compresión y flexión del compuesto elegido, después del ensayo no normalizado de cámara húmeda descrito en el apartado 5.2.2 y comparándolo con las muestras del mismo compuesto, antes de ser sometido al ensayo de humedad.

➤ Retención de agua

Al igual que pasa en el trabajo de investigación de Vidales Barriguete, A. [78] la retención de agua de los compuestos una vez sometidos al ensayo de humedad, es menor respecto al de su referencia. Observamos en la Tabla 18 que, a mayor contenido de residuo, la retención de agua es menor. Llegando a ser un 40% menor que la retención en la muestra de referencia en el compuesto de 0,5-CF-A+.

DENOMINACIÓN	PESO (g) ANTES DEL ENSAYO (SECO)	PESO (g) DESPUÉS DEL ENSAYO (HÚMEDO)	RETENCIÓN Δ AGUA %
REF.0,5	338,20	344,78	1,91%
0,5-CF-B	345,22	349,89	1,33%
0,5-CF-M	342,65	346,96	1,24%
0,5-CF-A	341,93	345,88	1,14%
0,5-CF-A+	342,02	345,56	1,04%

Tabla 18: Retención de agua, antes y después del ensayo cámara húmeda.

➤ Dureza SHORE C

Es sabido que el yeso húmedo presenta menos dureza superficial, que cuando está en estado seco. Esto se puede observar en los resultados obtenidos a continuación mostrados en la Figura 68, en los que se compara los compuestos una vez expuestos a la humedad, con los de referencia (secos).

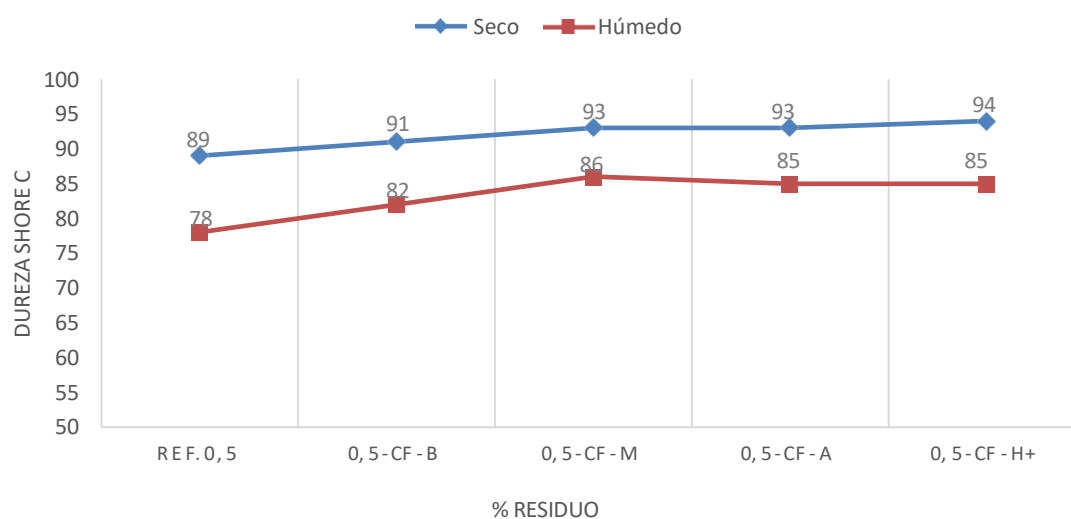


Figura 68: Dureza Shore C antes y después del ensayo cámara húmeda.

Se aprecia que el yeso en estado seco llega a alcanzar los 94 puntos Shore C, mientras que en estado húmedo la dureza máxima que se alcanza es de 86 puntos, siendo con el compuesto 0.5-CF-M.

➤ Resistencia mecánicas.

Tanto la resistencia a flexión como a compresión, en los yesos húmedos disminuyen, al igual que sucede en múltiples investigaciones como es el caso de Alicia de San Antonio [79]. En este apartado se han comparado las resistencias obtenidas después del ensayo de cámara húmeda con las muestras secas de los ensayos mecánicos anteriores (Tabla 14).

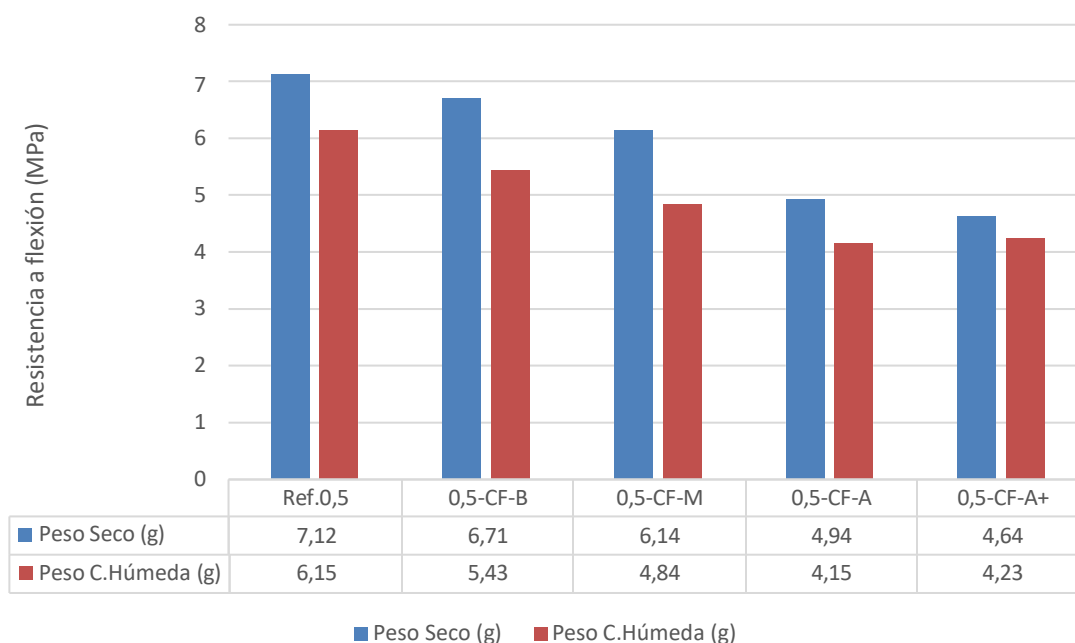


Figura 69: Resistencia a flexión antes y después del ensayo cámara húmeda.

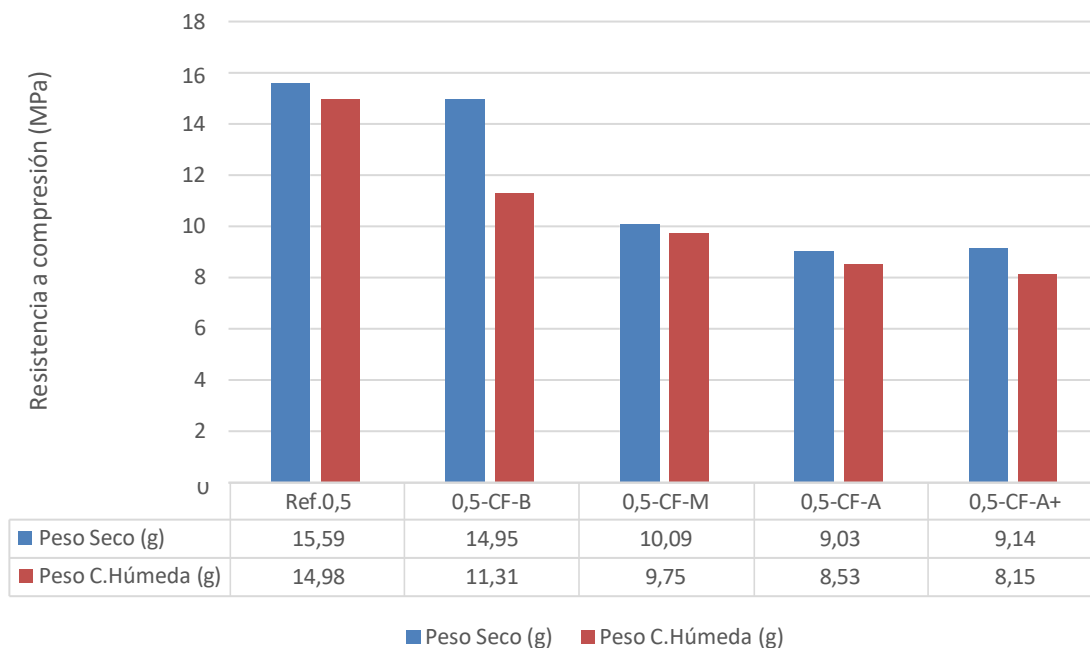


Figura 70.: Resistencia a compresión antes y después del ensayo cámara húmeda.

El comportamiento de la resistencia a flexión y compresión después del ensayo húmedo es similar al comportamiento en estado seco comentado en el apartado 6.2 según la Tabla 14. Respecto a la diferencia entre el estado seco y húmedo se puede observar que existe una disminución clara de las resistencias. Llegando a obtener una disminución máxima de la resistencia a flexión del 21% respecto al seco con el compuesto 0,5-CF-M y del 24% con el compuesto 0,5-CF-B en el caso de la resistencia a compresión.

➤ Comportamiento frente al fuego.

El comportamiento frente al fuego es una característica fundamental en la edificación contemporánea dónde se están alcanzando límites que hasta hace poco eran insospechados, tanto en cuanto a proporciones físico/geométricas como a instalaciones de nueva creación y a la enorme tecnificación de las tradicionales.

Todos los materiales que se incorporen a un edificio deben tener una resistencia a la creación y propagación de incendios, junto a otros factores que deben ir en la misma dirección como: diseño, ubicación, fuentes posibles de propagación. Las normativas nacionales e Internacionales recogen disposiciones específicas de protección para el fuego, que son renovadas continuamente para adaptarse a las nuevas tecnologías e investigaciones. Debido a lo anteriormente expuesto, cualquier material que pretenda incorporarse al proceso productivo debe comprobar su comportamiento frente al fuego, para ello se ha realizado el ensayo real a fuego directo, que debido a que el comportamiento de las muestras con A y A+ es similar, se ha prescindido de las muestras con A+ de residuo, debido a que el diseño de la parrilla del ensayo así lo exigía. En la Tabla 19 se adjuntan los resultados obtenidos.

DENOMINACIÓN	TEMPERATURA EN (°C)					
	0 MIN	5MIN	10MIN	15MIN	20MIN	25MIN
REF,0,5 EXTERIOR	7,5	204	348	498	428	369
REF 0,5 MEDIO	7,5	213	366	373	327	344
REF 0,5INTERIOR	7,5	263	393	377	322	204
0,5-CF1-B EXTERIOR	7,5	251	405	410	382	291
0,5-CF2-B MEDIO	7,5	252	400	406	344	202
0,5-CF3-B INTERIOR	7,5	208	346	351	301	176
0,5-CF1-M EXTERIOR	7,5	250	330	392	312	176
0,5-CF2-M MEDIO	7,5	300	349	393	313	196
0,5-CF3-M INTERIOR	7,5	294	380	398	382	210
0,5-CF1-A EXTERIOR	7,5	232	450	489	365	291
0,5-CF2-A MEDIO	7,5	291	305	387	334	214
0,5-CF3-A INTERIOR	7,5	215	300	333	263	189

Tabla 19: Resultado ensayo fuego directo

De manera global se comprueba que alcanza mayor T^a en un supuesto de incendio, la muestra 0,5-CF1-A exterior con 489°C en unos 15 min y enfriándose hasta 291°C en diez minutos conforme va descendiendo el calor aportado, sin producirse deformaciones ni propagación de la llama.

En este ensayo no se obtiene la curva de T^a /Tiempo que se produciría en el momento de la 1º deformación, agrietamiento o desconchado, elevando el calor aportado hasta ese momento. Pero sí nos da una idea de que es un producto resistente al fuego, incombustible y que en un incendio no es causante de propagación. Su comportamiento sería similar a los revestimientos de yeso/escayola que actualmente son universalmente utilizados.

A continuación, se desglosa el comportamiento frente al fuego de los compuestos según el mismo porcentaje de residuo y disposición (Figura 71) en T^a /Tiempo y en segundo lugar el comportamiento de las mezclas de igual posición, pero diferente porcentaje de residuo (Figura 73).

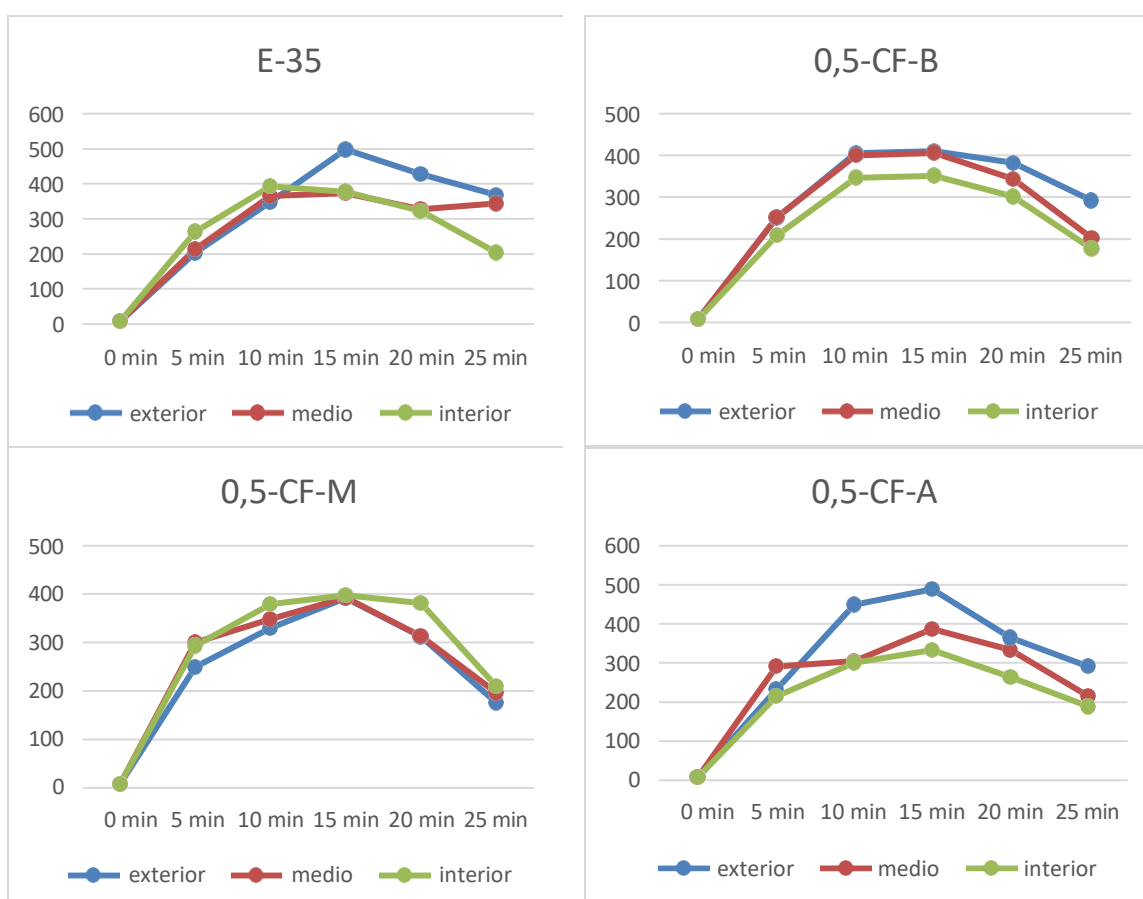


Figura 71: Temperaturas alcanzadas por los distintos compuestos y disposiciones.

De la gráfica arriba a la izquierda de las probetas sin residuo se observa que las máximas temperaturas se producen en el intervalo de tiempo de 10 a 20 min, con la particularidad de iniciarse el agrietamiento y posterior rotura a los 15 min aproximadamente de haber comenzado el ensayo y con una lectura de t^a media de 400°C.

En el gráfico contiguo que corresponde a las probetas con un 10% de residuo las máximas temperaturas se consiguen a los 15 min con un máximo de 410°C. A continuación, las temperaturas van descendiendo debido a la pérdida de calor aportado por el fuego al ir consumiéndose hasta llegar a una temperatura de enfriamiento de 176°C. En estas muestras no se aprecian grietas, ni desprendimientos, tan sólo un tono oscuro al estar en contacto con los gases de combustión.

En la gráfica inferior izquierda con un 15% de residuo en el intervalo de 10 a 15 min se alcanzan las temperaturas más altas alcanzando un máximo de 398°C en las muestras del interior. Igual que en el caso anterior a partir de ese tiempo (15 min) se produce el descenso de T^a . En este caso no se aprecian ni fisuras, ni grietas, ni roturas ni durante el ensayo, ni al final Figura 72. Finalmente, en la gráfica con un A% de residuo la máxima temperatura de 489°C se producen en el tramo de 10 a 15 min, sin producirse deformaciones, ni fisuras excepto el cambio de coloración en la superficie.



Figura 72: Estado de las probetas después del ensayo a fuego directo.

Es conveniente estudiar las distintas mezclas por la zona que ocupan, debido a la diferencia de T^a en las distintas posiciones, debido al tipo de ensayo sin normalizar.

- Posición Exterior
- Posición Medio
- Posición Interior

- *P. Exterior* (Figura 73)

La mayor temperatura de las mezclas la alcanza la del A% con 489°C a los 15 min, a continuación, van descendiendo las temperaturas al disminuir la aportación de calor, con una diferencia del 22% con otras posiciones.

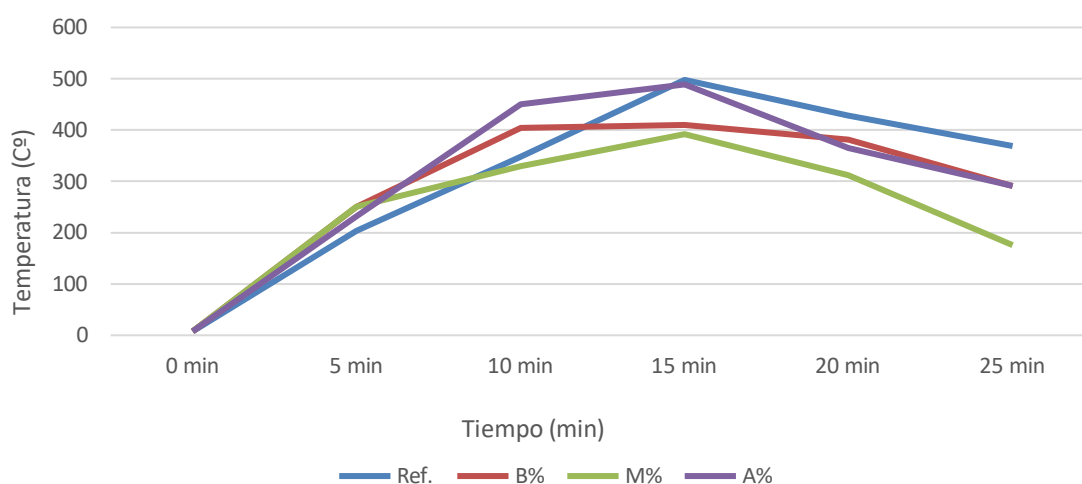


Figura 73. Temperaturas alcanzadas por las probetas exteriores.

- *P. Medio* (Figura 74)

La probeta situada en medio y con una proporción del L % alcanza la T^a de 406 °C a los 15 min, con diferencias no mayores del 5% con otras mezclas.

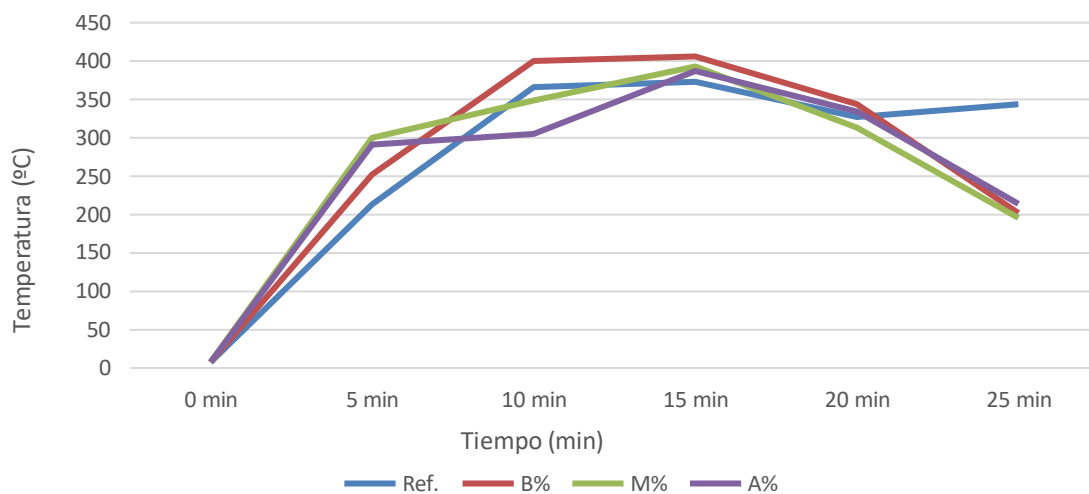


Figura 74: Temperaturas alcanzadas por las probetas en posición intermedia.

- *Interior* (Figura 75)

Es la zona que menos calor recibe y por tanto adquiere menos temperatura. Con una lectura máxima de T^a 398 °C del compuesto del M % (20%) de residuo.

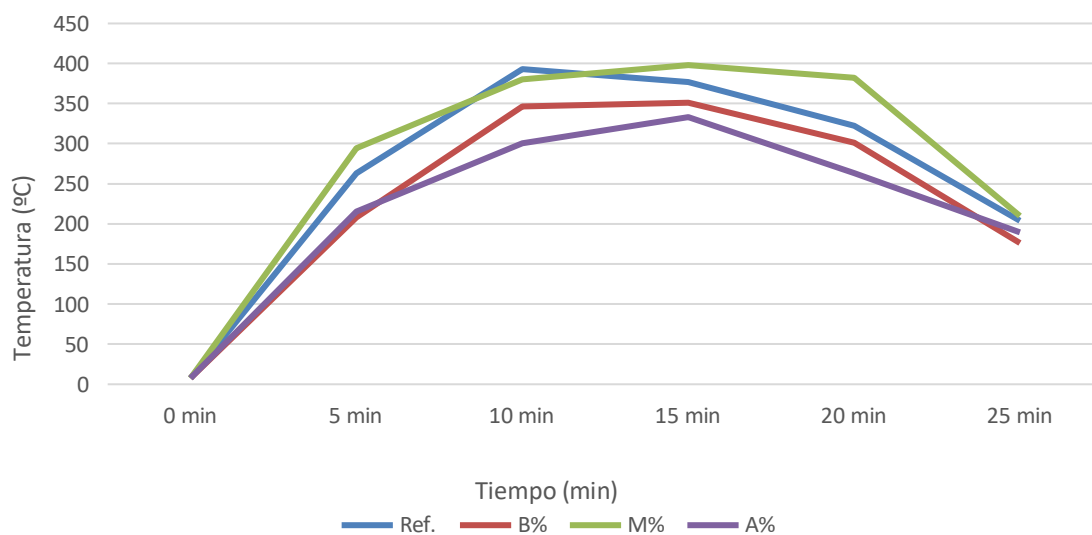


Figura 75: Temperaturas alcanzadas por las probetas en posición interior.

➤ Coefficiente de Conductividad térmica.

El comportamiento térmico fue parecido al de otras investigaciones de yeso con residuos, observando que los compuestos con residuos, mejora la conductividad térmica. En el caso de Alejandro Pedreño [142] la adición de residuos de madera y la disminución de la densidad de los materiales, produce una mejora en la conductividad de los compuestos. Esta mejora es mayor cuando se incrementa el porcentaje de residuos de madera utilizados. Mientras que la investigación con XPS de [79] se consigue con un tamaño de partícula entre 2-6mm y un porcentaje del 4 % una conductividad térmica de 0,088 (W/mk) un valor menor que el de su referencia (0,140 W/mk).

En esta investigación los resultados del ensayo de conductividad térmica disminuyeron, al aumentar el contenido de residuos y la relación agua/yeso Figura 76. Obteniéndose el mejor valor para las placas 0,5-CF-A+, mejorando un 32% con respecto a la referencia.

La conductividad térmica de los nuevos compuestos es menor que la establecida para las placas comerciales convencionales de Saint-Gobain Construcción Products. Por otro lado, se observa que los nuevos compuestos tienen un mejor comportamiento térmico para placas de falso techo, comparándolo con los valores máximos establecidos, por la norma UNE-EN 14246.

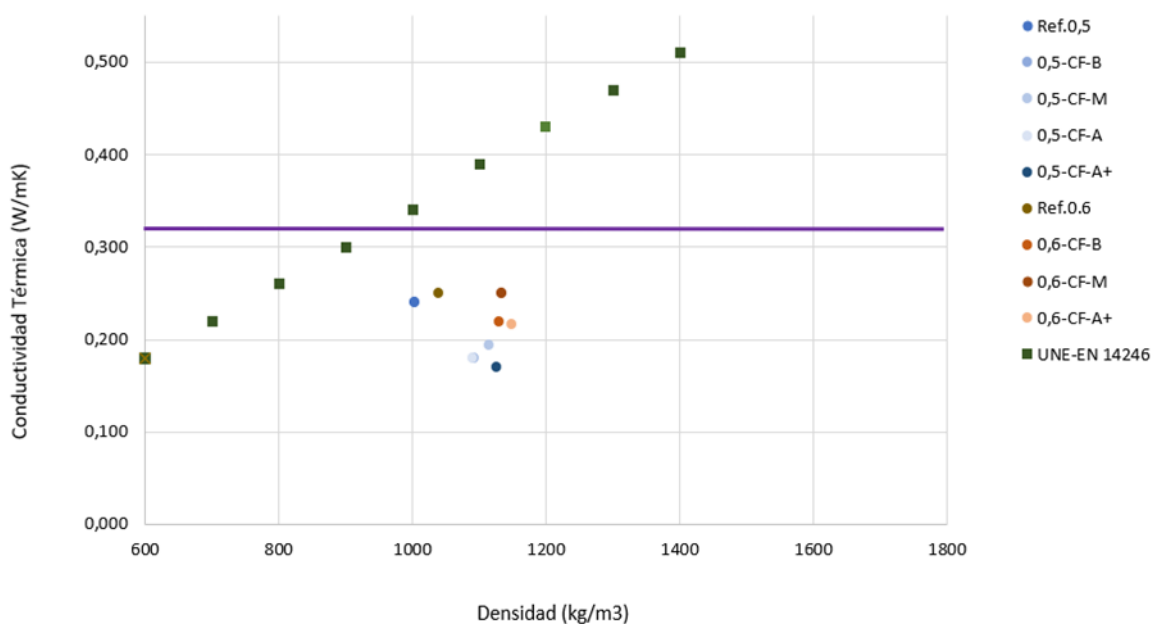


Figura 76: Resultados del comportamiento térmico.

RESULTADOS DE LA APLICACIÓN CONSTRUCTIVA

CAPÍTULO 07

CAPITULO 7: RESULTADOS DE LA APLICACIÓN CONSTRUCTIVA (OBJ 2)

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología para alcanzar el segundo objetivo específico: “Desarrollar una aplicación constructiva con compuestos de yeso + residuos de pelotas pádel/tenis, en edificación”

Fase 2.1: Planteamiento y caracterización de aplicaciones constructivas en edificación, desarrolladas con los nuevos compuestos de yeso elaborados”.

Fase 2.2: Evaluación del beneficio energético y medioambiental al incorporar los residuos de pelotas de pádel/tenis en las nuevas aplicaciones desarrolladas.

7.1 CARACTERIZACION DE LAS APLICACIONES CONSTRUCTIVAS (Fase 2.1)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del estudio teórico y experimental realizados para las placas para falsos techos discontinuos, definidos en los apartados 5.3.1 y 5.3.2.

7.1.1 Estudio Teórico

En primer lugar, se ha realizado un estudio individualizado para cada una de las placas evaluadas (la Tabla 20 muestra a modo de ejemplo el procedimiento seguido para la placa REF 0,6).

En dicho estudio, se ha comprobado la tensión máxima de tracción alcanzada en la modelización del ensayo con el valor experimental de la resistencia a tracción de cada compuesto.

REF 0.6		Mapa de Desplazamientos
Datos del Material		
Datos Previos:		
$\rho = 1039 \text{ kg/m}^3$	$E = 919,75 \text{ MPa}$	
$\sigma_{\text{máx}, F} = 6,68 \text{ MPa}$	$\sigma_{\text{máx}, C} = 15,2 \text{ MPa}$	
$\sigma_{\text{máx}, T} \approx 0,1 \cdot \sigma_{\text{máx}, C} \approx 1,52 \text{ MPa}$		
Resultados de cálculo:		
$D_{\text{máx}} = 0,0011 \text{ mm}$	$\sigma_{\text{máx}, C} = 0,61 \text{ MPa}$	
$\sigma_{\text{máx}, T} = 0,61 \text{ MPa} \leq 1,52 \text{ MPa}$		
Tensiones de Compresión	Tensiones de Tracción	

Tabla 20: Ejemplo de tabla desarrollada para la evaluación mecánica de la placa REF 0,6.

Así, la Figura 77 compara ambos valores para todos los compuestos estudiados, observándose que los casos más dificultosos son los correspondientes a las placas 0,6-CF-A y 0,6-CF-A+. El resto de las placas cumplen sobradamente con las exigencias del ensayo a flexión. Estos datos serán empleados para la posterior etapa experimental en laboratorio.

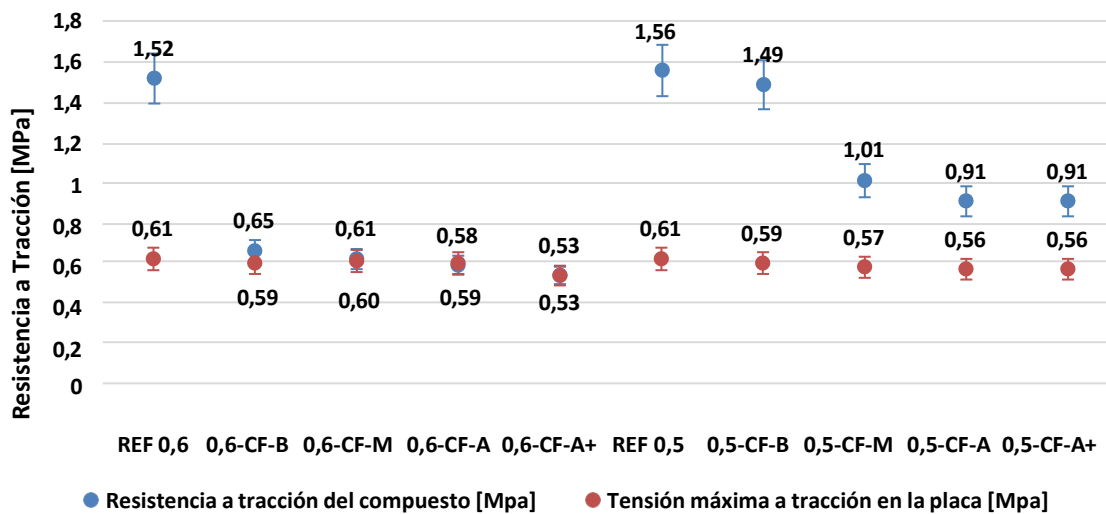


Figura 77: Comparación tensión máxima admisible a tracción y tensión máxima a tracción en ensayos.

7.1.2 Estudio Experimental

En una segunda fase, después de la simulación mecánica, se probaron en laboratorio las placas REF 0,6 y 0,6-CF-A+. En este procedimiento se verificó que ambas placas soportaron la carga normativa (0,1 kN/m) durante 30 minutos. Posteriormente, se obtuvieron resistencias de rotura superiores a las simuladas para ambas placas: alcanzando 1,12 MPa para la placa REF 0,6 y 0,64 MPa para la placa 0,6-CF-A+. Por lo tanto, se puede concluir que todos los materiales compuestos desarrollados son adecuados para su uso como placas de yeso para falsos techos.

7.1.3 Resistencia al Choque-Impacto de las Placas

Los resultados obtenidos en el ensayo al choque-impacto, de las diferentes combinaciones, se detallan a continuación:

DENOMINACIÓN	DIÁMETRO DE LA HUELLA (mm)	PROFUNDIDAD DE LA HUELLA (mm)	PROFUNDIDAD DE LA HUELLA RESPECTO A LA REF (%)
REF.0,6	16,00	1,31	rompe
0,6-CF-B	11,87	0,75	- 42,623
0,6-CF-M	9,33	0,45	- 65,65
0,6-CF-A	7,91	0,31	-75,95
0,6-CF-A+	7,66	0,30	-77,36

Tabla 21:Ensayo de resistencia al impacto de las placas.

La muestra que se toma como referencia rompe tras recibir el primer impacto de la bola. Mientras que, en el caso de las muestras con diferentes proporciones de residuo, la bola de acero rebota, dejando una profundidad de huella sin llegar a romper. El compuesto que tiene mayor resistencia al choque es el que contiene un A+% de residuos (0,30 mm de profundidad de huella), siendo muy próximo el resultado al obtenido con la muestra del A % (0,316mm de profundidad de huella). El compuesto, 0,6-CF-B con menor porcentaje de adición es el de menor resistencia al choque (0,75 mm de profundidad de huella). No obstante, las muestras con residuo estudiadas mejoran el comportamiento frente al impacto-choque, con respecto a la muestra de referencia de matriz sin residuo.

7.2 EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO ENERGETICO Y MEDIOAMBIENTAL(Fase 2.2)

En este apartado se incluyen los resultados relacionados con la evaluación energética y medioambiental explicado en el apartado de metodología 5.4.2.

7.2.1 Potencial de eficiencia energética

Los resultados obtenidos del análisis de eficiencia energética descrito en la metodología son:

En primer lugar, se analizan los consumos del edificio con los materiales tradicionales de cara a conocer la demanda energética del edificio a lo largo de año.

En segundo lugar, se realizan simulaciones sustituyendo el yeso sin residuo por yeso con residuos con el fin de conocer el potencial de eficiencia energética de los compuestos desarrollados en el ahorro energético del edificio.

- **Consumo del edificio con materiales de yeso sin residuo**

En este apartado se analizan las pérdidas energéticas en el edificio de referencia en ambas localizaciones, así como el potencial de mejora en el ahorro energético del mismo. En términos absolutos, el gasto energético debido a calefacción es de 80609,52 kWh, que es superior al gasto en refrigeración de 33236,89 kWh en Sevilla; mientras que, en Soria, las pérdidas debidas a la calefacción son de 303203,38 kWh, superior al gasto de refrigeración de 3862,79.

Los consumos obtenidos son bajos debido a que se trata de un edificio de nueva planta que cumple con todos los requisitos energéticos y constructivos establecidos en la normativa.

El consumo debido a climatización (frío y calor) puede deberse a la transferencia de calor por transmisión a través de la envolvente o bien a las renovaciones de aire. En esta investigación la mejora en la eficiencia energética del edificio únicamente se limita a la reducción de la transferencia de calor por transmisión en la envolvente mediante el uso de nuevos materiales diseñados a partir de residuos de obra. Es por ello, que el primer paso es conocer el porcentaje de pérdidas energéticas en ambas ciudades debidas a las renovaciones de aire o transferencia de calor a través de la envolvente.

En Sevilla se observa que en el supuesto de que no existiera transmisión de calor a través de la envolvente del edificio siempre existirían pérdidas por renovaciones del aire (72%) frente a las pérdidas por transferencia de calor (28%). Por ello, el ahorro energético del edificio debido a climatización (frío y calor) está limitado al 44 % del gasto total. En cuanto al comportamiento del edificio en función de la época del año, en los meses de frío donde se produce el mayor consumo del edificio, el consumo de calefacción se debe principalmente a pérdidas energéticas por renovaciones de aire del sistema de ventilación y las infiltraciones de aire. Por otro lado, en los meses de calor el consumo de refrigeración se debe a ganancias energéticas por transferencia de calor a través de la envolvente del edificio.

También se puede observar que las pérdidas de energía se producen igual en el acristalamiento, muros y suelo estando entorno al 27% y 28%, mientras que, en la cubierta, las pérdidas se reducen llegando a un 18%.

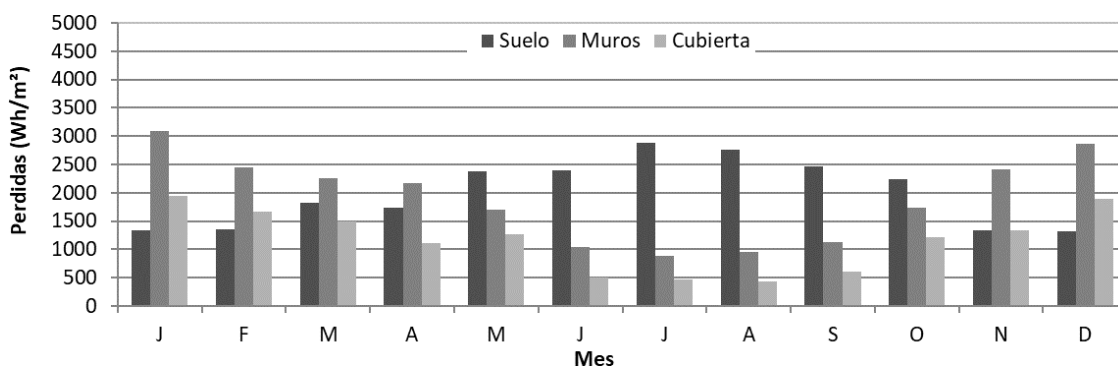
Por otro lado, en Soria percibimos que en el supuesto de que no existiera transmisión de calor a través de la envolvente del edificio siempre existirían pérdidas por renovaciones del aire (78%) frente al 22% de pérdidas por transferencia de calor. Por ello, el ahorro energético del edificio debido a climatización (frío y calor) está limitado al 20 % del gasto total. En cuanto al comportamiento del edificio en función de la época del año, en los meses de frío donde se produce el mayor consumo del edificio, el consumo de calefacción se debe de nuevo a pérdidas energéticas por renovaciones de aire del sistema de ventilación y las infiltraciones de aire.

Por otro lado, en los meses de calor el consumo de refrigeración se debe a ganancias energéticas por transferencia de calor a través de la envolvente del edificio.

Las pérdidas de energía se producen mayoritariamente a través del acristalamiento (36%) mientras que en la cubierta y los muros de fachada (21% y 30%, respectivamente) el impacto es más moderado, bajando en el suelo considerablemente (13%).

En la actualidad resulta compleja la implementación de materiales reciclados procedentes de la obra para la fabricación de superficies de acristalamiento no existiendo estudios previos en la materia. Además, esta investigación se centra en la aplicación de nuevos materiales con base de yeso o cemento, por lo que su aplicación está limitada a la parte ciega de la envolvente. Por este motivo, el acristalamiento no se considera en el análisis de los resultados. A pesar de lo anterior el potencial de mejora sigue siendo considerable ya que la cubierta, los muros de fachada y el suelo representan un 73% en Sevilla y un 64% en Soria de pérdidas de calor por la envolvente.

Otro aspecto interesante es el comportamiento de la evolución temporal de la transmisión de calor a través de la envolvente. Las Figura 78 y Figura 79 muestran las pérdidas-ganancias energéticas por transmisión según la superficie a lo largo del año en Sevilla y Soria, respectivamente. Los valores de transmisión de calor se han normalizado en relación con el área de suelo construida (Wh/m^2) para poder realizar comparaciones con otros estudios.



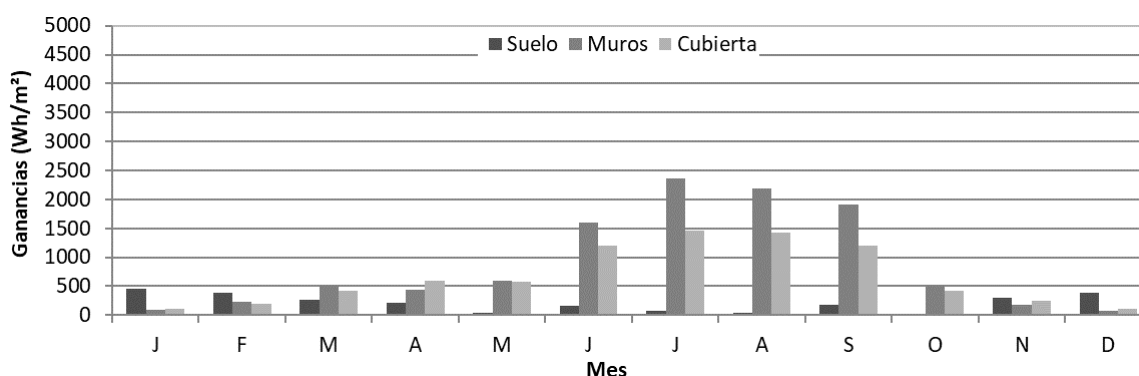


Figura 78.: Pérdidas-ganancias energéticas por transmisión según la superficie a lo largo del año en Sevilla.

Se observa que las pérdidas de calor aumentan en la cubierta y en los muros de fachada en los periodos de frío mientras que en el suelo sucede todo lo contrario. Este hecho se debe a la inercia térmica del terreno, que permite amortiguar las oscilaciones térmicas del exterior manteniendo una temperatura más constante durante todo el año.

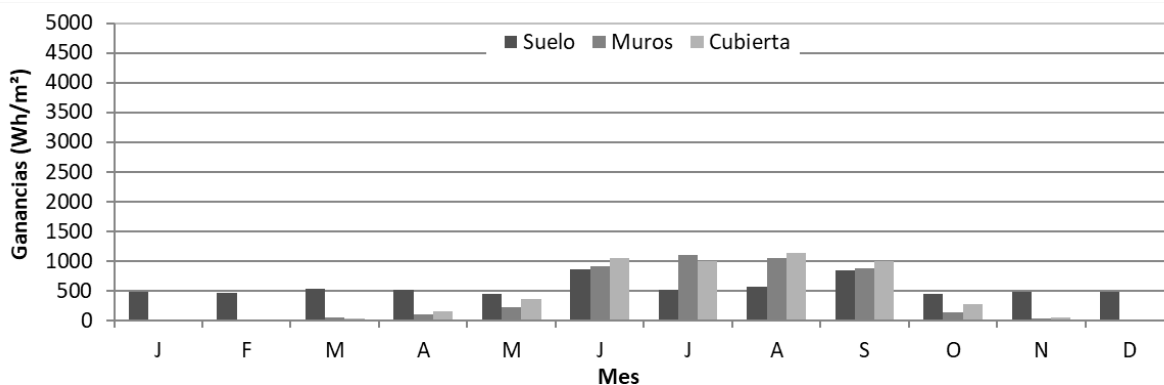
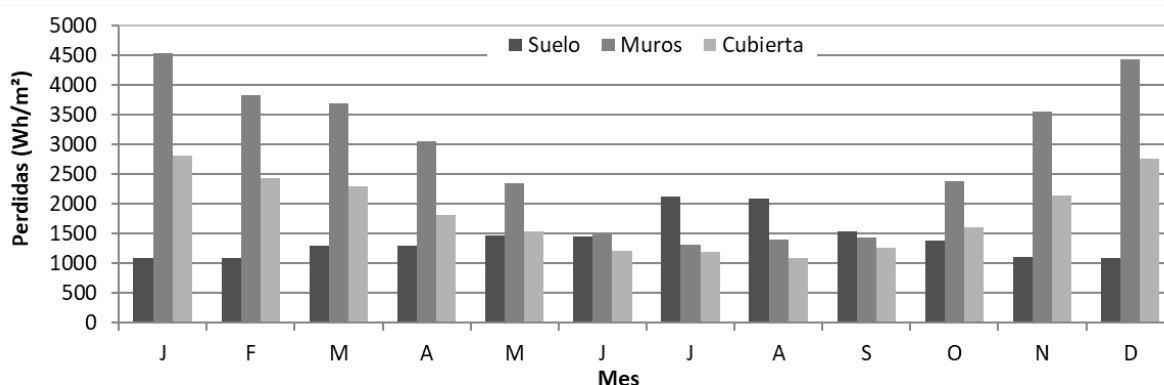


Figura 79.: Pérdidas- ganancias energéticas por transmisión según la superficie a lo largo del año en Soria.

Además, en los meses de frío, las pérdidas de calor se dan en mayor medida a través de los muros de fachada superando los 3000 Wh/m² en Sevilla y los 4500 Wh/m² en Soria mientras que en los meses de calor se alcanzan valores similares en todos los elementos constructivos de la envolvente (cubierta, suelo y muros de fachada) en Soria. Por el contrario, en verano el suelo en Sevilla alcanza niveles superiores a los 2800 Wh/m², mientras que la fachada y la cubierta mantienen unos niveles parecidos entorno a los 500-1500Wh/m². Este comportamiento se explica en gran medida por la irradiación solar que recibe la envolvente que depende de la inclinación del sol respecto los muros de fachada y la cubierta.

En cuanto a las ganancias de calor, se observa que se producen en mayor medida en los meses de verano, a través de la cubierta en Soria y los muros de fachada en Sevilla, mientras que a través del suelo son prácticamente inexistentes en Sevilla, conservándose más o menos alrededor de los mismos valores en Soria. Las ganancias de calor son bastante pequeñas en el edificio cuando se comparan con las pérdidas de calor vistas anteriormente.

- **Estudio comparativo entre yeso sin residuo y yeso con residuo.**

Los resultados obtenidos en las simulaciones el potencial de eficiencia energética del material con residuo está muy condicionado a la tasa de renovaciones de aire en el edificio, con un 79% del consumo de energía debido a renovaciones de aire frente a un 21% debido a la transferencia de calor a través de la envolvente. Por tanto, es importante señalar que, en edificios con bajas tasas de renovación de aire, el potencial de ahorro energético de los materiales reciclados será mucho mayor.

La Tabla 22 compara el ahorro total en calefacción, refrigeración y la suma de ambos en las dos ciudades españolas objeto de estudio.

<i>Transferencia de calor</i>		<i>Calefacción</i>		<i>Aire acondicionado</i>		<i>Calef. + Aire acond.</i>	
		Consumo (kWh)	Ahorro	Consumo (kWh)	Ahorro	Consumo (kWh)	Ahorro
SEVILLA							
<i>TRA</i>	Renovaciones	63902		26348		90250	
<i>CF25</i>	Renovaciones	62360	2%	25751	2%	88112	2%
<i>TRA</i>	Fachada/cubierta	16707		6889		23596	
<i>CF25</i>	Fachada/cubierta	15598	7%	6441	6%	22039	7%
SORIA							
<i>TRA</i>	Renovaciones	246380		3139		249519	
<i>CF25</i>	Renovaciones	245335	0%	2834	10%	248169	1%
<i>TRA</i>	Fachada/cubierta	56824		724		57548	
<i>CF25</i>	Fachada/cubierta	54193	5%	626	14%	54819	5%

Tabla 22. Consumo energético por transferencia de calor de las renovaciones de aire y a través de la envolvente del edificio situado en Sevilla y Soria

Los resultados muestran que el material con residuo mejora la eficiencia energética de los edificios al tiempo que ofrece una segunda vida a un residuo industrial. El ahorro energético que se obtiene en un edificio estándar español siguiendo la normativa de edificación vigente oscila entre el 7% (clima cálido) y el 5% (clima frío), siendo mayor en calefacción que en refrigeración en términos absolutos.

Además, el ahorro económico de reducir el consumo energético en climatización puede llegar al 6% (Sevilla) y al 14% (Soria), mientras que en calefacción puede llegar al 5% (Soria) al 7% (Sevilla). Estos valores podrían aumentar considerablemente en edificios o construcciones con bajos índices de ventilación, como, por ejemplo, en almacenes que no necesitan ventilación o en países exentos de normativas que exigen ventilación (o con bajos requisitos).

La estrategia de incluir materiales reciclados en los edificios para reducir el consumo energético presenta un gran potencial.

7.2.2 Beneficio Medioambiental de los Compuestos: ACV.

Para evaluar el impacto ambiental de la agregación de residuos de pelotas de pádel/tenis sobre una matriz de escayola, con diferentes porcentajes, para la elaboración de placas de falso techo, se realizó un análisis ambiental comparativo simplificado utilizando la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) (desde la cuna hasta la puerta). Así, el impacto ambiental de cada placa se obtuvo de la siguiente manera:

- Identificación y cuantificación de los diferentes materiales utilizados para el desarrollo de los nuevos compuestos, procesos de fabricación, transporte y construcción.
- Aplicación de la metodología ACV para obtener el impacto ambiental de cada mezcla.

Mediante este procedimiento se determinó el compuesto/placa que implica menor impacto en las diferentes etapas del ACV.

- *Definición de objetivos y alcance*

El objetivo principal es realizar la evaluación ambiental de diferentes materiales compuestos para su utilización como placas de falsos techos discontinuos en el interior de edificios. El objetivo es determinar si existe una mejora viable de la sostenibilidad ambiental al implementar en la matriz de escayola los residuos CF.

Para obtener el impacto ambiental de las nuevas placas, se identificaron los indicadores de impacto más relevantes a utilizar en el ACV para aplicaciones en construcción: el Calentamiento Global Potencial (GWP) y Energía Incorporada (EE). Por tanto, la evaluación de impacto se realiza utilizando el método CML 2001 en relación con la categoría de impacto GWP y la “Cumulative Energy Demand” (CED) en relación con la EE.

La unidad funcional considerada en este estudio es una unidad de placa de falso techo (600 mm de lado y 15 mm de espesor), teniendo en cuenta que cada placa posee diferentes cantidades de escayola, residuos de CF y agua. Como se muestra en la Figura 80, el límite del sistema para el proceso tuvo tres fases diferentes:

- Fase de fabricación / obtención de las materias primas: incluye todos los procesos para la obtención de los diferentes materiales de construcción utilizados para desarrollar los nuevos compuestos (escayola, residuos CF y agua).

- Fase de transporte: se estudió el transporte del residuo de pelotas a la central de producción de las placas.
- Fase de construcción / creación de las placas: abarca todo el procedimiento de mezclado para la obtención de las nuevas placas con residuos.

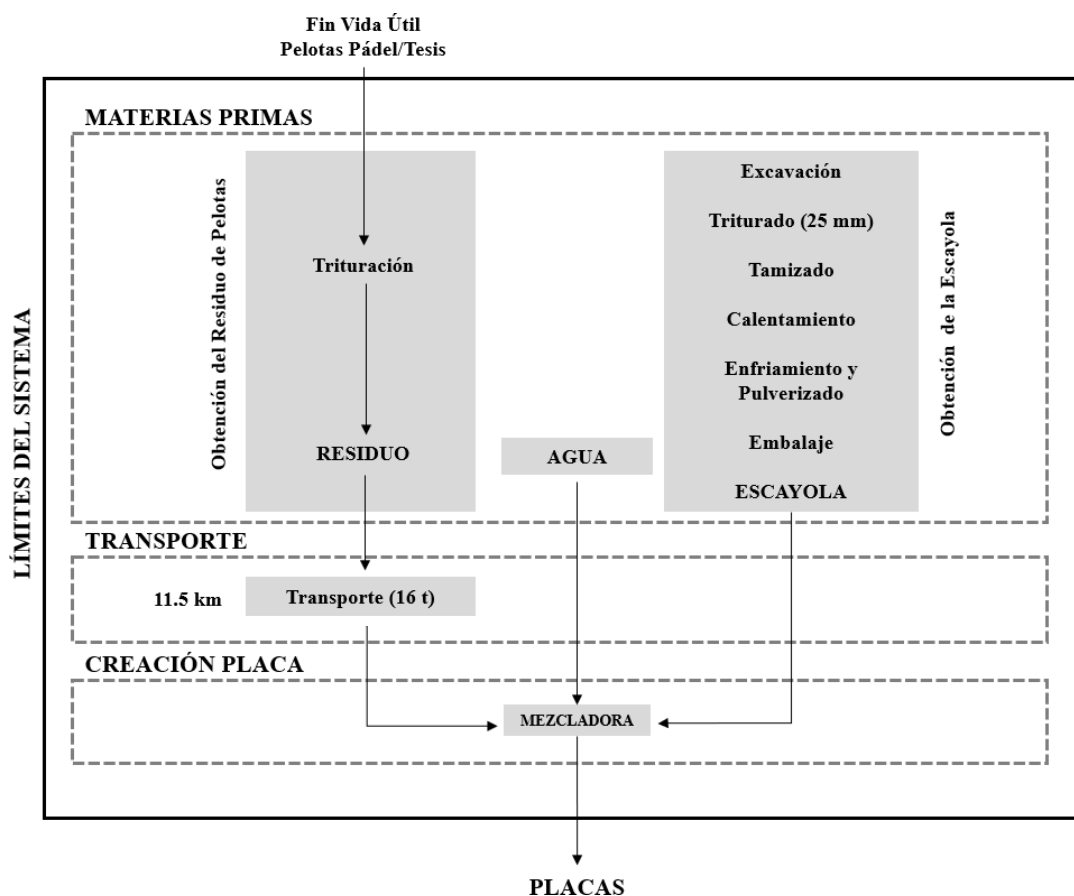


Figura 80: Límites del sistema ACV.

Al evaluarse el desarrollo de nuevos productos de construcción, se descuidaron las fases de demolición y disposición final de los límites del sistema (sistema de la cuna a la puerta).

- ***Inventario del ciclo de vida (ICV) y Evaluación de impacto del ciclo de vida (IACV)***

Para obtener el inventario del ciclo de vida de la producción de cada placa se utilizó el siguiente procedimiento, presentando las siguientes fases:

- *Identificación de los procesos y productos que se utilizaron para desarrollar las nuevas placas.* En ese sentido, se evaluaron todas las fases para la obtención de la escayola (A). Por otro lado, los residuos de pelotas se obtuvieron directamente de la empresa recicladora. Para su uso como árido a los yesos se ha considerado únicamente el procedimiento de trituración del residuo CF, evitando todas las demás fases de gestión de residuos plásticos para el análisis del ACV (vertido, incineración, etc.).
- *Cuantificación del transporte.* El residuo ha de ser transportado desde la planta de reciclaje hasta la central de producción de las placas. Para el inventario se determinó el medio de transporte utilizado y la distancia.
- *Inventario del proceso constructivo.* En este caso sólo incluyó el uso de la máquina de mezcla, que fue la misma para todos los compuestos.
- *Determinación del impacto ambiental de cada proceso unitario.* Se utilizaron las bases de datos ITEC y Ecoinvent para obtener los valores de impacto de cada proceso unitario.
- *Evaluación.* Para obtener la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida de todo el procedimiento, se evaluaron los impactos del Potencial de Calentamiento Global (GWP) 100 a y de la Energía Incorporada (EE).

Así, en la Tabla 23 se muestra una lista de los datos extraídos (inventario) para cada material y proceso incluidos en la evaluación de impacto ambiental de los compuestos en estudio.

Component	ID	Name in Database	Database	Ud	GWP [kg CO ₂ eq]	EE [MJ]
Escayola	B0521100	Escayola A según EN 13279-1	ITEC	kg	0,16	1,80
Agua	2288	Tap water, at user	Ecoinvent	kg	0,01	0,01
Electricidad	698	Electricity mix, Spain (construction)	Ecoinvent	kW h	0,50	10,90
Plastic Shredder	C1R2T600	Trituradora para residuos de construcción y demolición no pétreos, con capacidad para tartar de 10 a 25 m ³ /h, con medios mecánicos.	ITEC	h	21,83	273,88
Transport Mixer	1943	Transport, lorry, 16t	Ecoinvent	tkm	0,17	2,81
	C1704200	Mezcladora continua para morteros en sacos	ITEC	h	4,05	30,00

Tabla 23. Inventario del Ciclo de Vida.

- *Resultados del ACV*

En la Figura 81 y Figura 82 se muestra una comparación del GWP y el EE de los compuestos analizados.

Como se puede observar en ambas figuras, el uso de residuos de CF, obtenidos de la trituración de pelotas de pádel/tenis, como sustituto parcial de la escayola genera importantes beneficios ambientales en términos de consumo de energía (MJ) y calentamiento global (medido en kg CO₂ eq.). La reducción potencial de escayola requerida representó, en las muestras con un A+% de residuo, una disminución del 21,4% en el yeso utilizado, lo que se tradujo en una caída de las emisiones y del consumo energético.

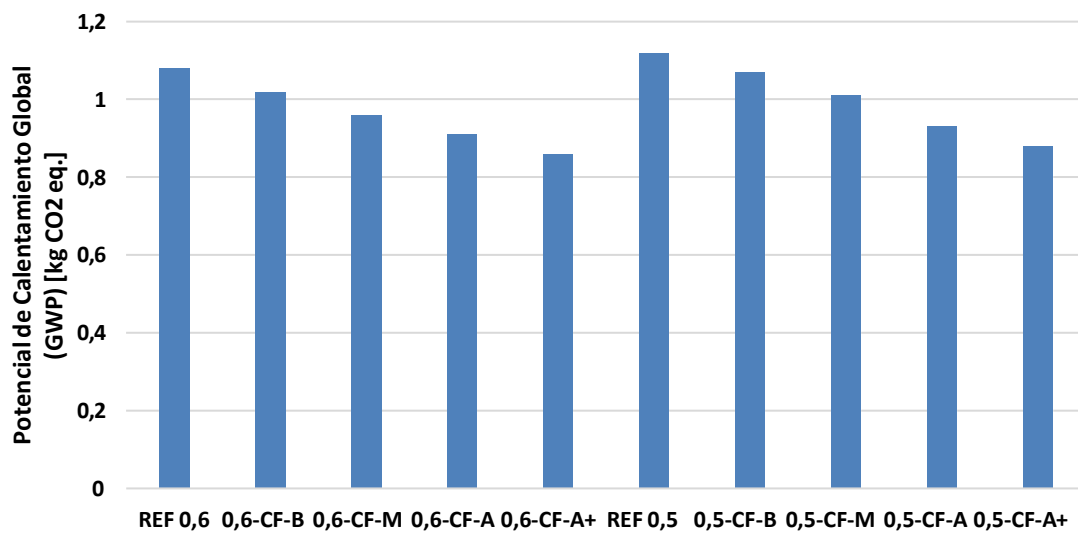


Figura 81: Resultados de las emisiones de GWP para cada placa.

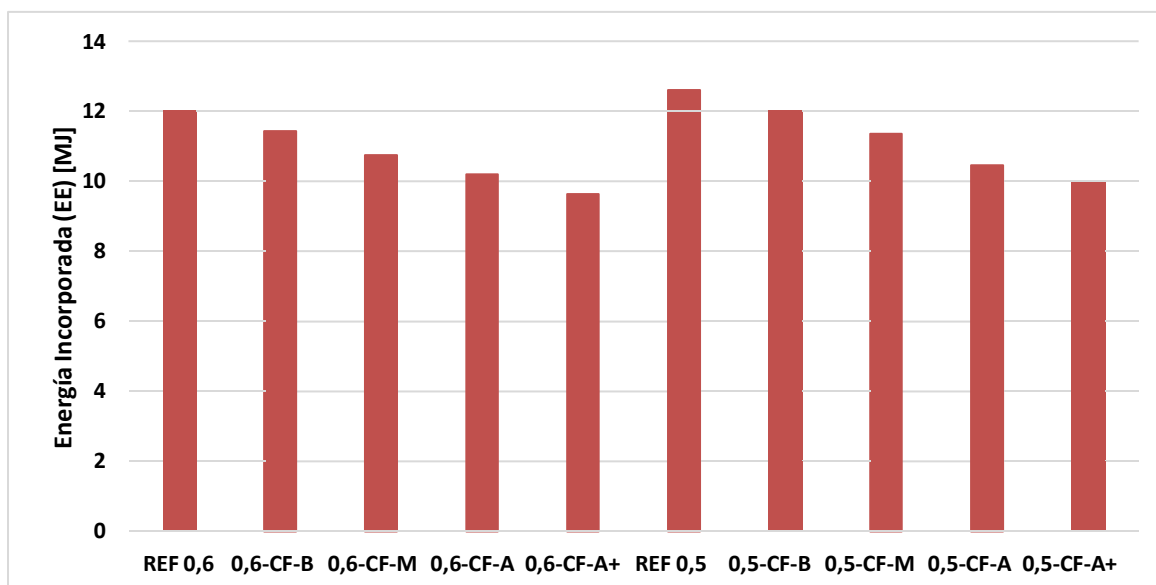


Figura 82: Resultados de los consumos de EE para cada placa.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 08

CAPITULO 8: CONCLUSIONES

El sector de construcción/edificación es el mayor causante de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, y por ello, es imprescindible implementar medidas urgentes que ayuden a revertir la situación.

Esta investigación plantea por un lado eliminar los residuos procedentes de las pelotas de Pádel/Tenis y, por otro, minimizar el consumo de materias primas como el yeso. Para ello, se ha desarrollado un nuevo material compuesto incorporando a la matriz de yeso dichos residuos. Una vez finalizado el proceso experimental y habiendo alcanzado los objetivos que se plantearon en esta tesis doctoral, se han podido establecer las siguientes conclusiones:

➤ ***“Caracterización de la materia prima: yeso y residuos de pelotas de p/t”.***

- El 70% de los residuos obtenidos procedentes de la fabricación y del producto de las pelotas de P/T, después de una trituración mecánica simple que no afecta por tanto al medio ambiente, son de un tamaño entre 4-6mm.

➤ ***“Caracterización del compuesto de yeso y residuos de pelotas de P/T”.***

- Los resultados del SEM muestran que se trata de un nuevo compuesto más homogéneo y compacto gracias a la trabazón que presentan los filamentos de las fibras del residuo con las láminas que presenta el caucho.

- Las mezclas realizadas con el residuo de sólo fieltro admiten como máximo una cantidad de residuo del 10% y una relación w/y entre 1-0,7. No siendo trabajable la mezcla con más residuo u otras w/y.

- La densidad del material compuesto viene influenciada en primer lugar, por la relación w/y y el porcentaje de residuo. Siendo la mezcla más ligera la formada por el menor % fieltro y yeso (1-F-B) con una densidad de 0,72 g/cm³.

- Como era de esperar los ensayos de las distintas combinaciones desarrolladas, confirman que cuanto menor es la relación w/y, mayores son las resistencias a flexión y compresión. En cuanto a residuos, la presencia de fibras proporciona mayores resistencias. Siendo los valores más altos los obtenidos con el compuesto 0,5-CF- B resultado a flexión un 6,71 N/mm² y a compresión 14,95 N/mm² valores por encima de lo establecido por la Norma (1 y 2 N/mm² respectivamente).

- El comportamiento frente al agua mejora en las muestras con residuo, frente a los yesos de referencia (sin residuo), debido a la poca porosidad que se consigue en dichas muestras siendo el volumen máx. de poros del $9,37\text{mm}^3$.
- Los compuestos estudiados presentan un comportamiento ante el fuego, similar al del yeso comercial siendo un producto incombustible y no inflamable.
- La conductividad térmica disminuye con la incorporación del residuo CF obteniendo resultados que la mejoran en un 32% con respecto a la de referencia.

➤ ***“Aplicaciones constructivas”.***

- Las placas con residuos mejoran el comportamiento frente al impacto-choque, con respecto a las placas de referencia sin residuo. Obteniéndose en el compuesto 0,6-CF-A+ una profundidad de huella de 0,30 mm frente a los 1,31 mm de la de ref.0,6.

➤ ***“Evaluación del comportamiento energético”.***

- Se ha desarrollado un modelo de simulación energética para llevar a cabo simulaciones anuales que permitan cuantificar el potencial de eficiencia energética de los compuestos desarrollados.
- Al implementar los compuestos en diversas soluciones constructivas de envolvente y cubierta, se consigue mejorar la eficiencia energética del edificio, frente a cuando se utilizan soluciones tradicionales de yeso. El ahorro energético anual puede alcanzar hasta un 7% en climas cálidos (ej. Sevilla) y hasta un 5 % en climas fríos (ej. Soria).

Este material innovador incluye los beneficios de las materias primas secundarias y el problema de la eliminación de residuos de pádel-tenis. Los resultados del ciclo de vida del material indican que se produce una reducción considerable de las emisiones y del consumo energético, debido a la disminución en un 21,4% del yeso utilizado con las mezclas de CF y un A+% de residuo.

En este momento, los residuos de caucho y fieltro de la fabricación o derivados de pelotas de pádel / pádel usadas serían adecuados para la fabricación de paneles prefabricados como por ejemplo las placas de falso techo.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 09

CAPITULO 9: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado abre nuevas vías para futuras investigaciones. A continuación, se indican posibles líneas de estudio:

- Incorporar el residuo en morteros de cemento, de cal, hormigón; etc., y desarrollar nuevos materiales ecoeficientes para la edificación.

- Ampliar la campaña experimental del compuesto mediante el estudio de nuevas dosificaciones o características (ej. acústicas) para conocer mejor su potencial y posibles aplicaciones o formatos constructivos.

- Analizar la viabilidad de reciclaje de los nuevos compuestos para el desarrollo de productos o aplicaciones en construcción.

- Programar, considerando a todos los agentes implicados, el posible desarrollo a escala industrial del material compuesto, para la aplicación del producto en edificación

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Gestores de residuos (2020) *Clasificación de los plásticos*. www.gestoresderesiduos.org
2. Construcción, O.d.l (2022) *Informe sobre el sector de la construcción*. <https://www.observatoriodelaconstruccion.com/>
3. Construcción, O.d.l (2023) *Informe sobre el sector de la construcción (II)*. <https://www.observatoriodelaconstruccion.com/>
4. ONU (1972) *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano*. <https://www.un.org/es/index.html>
5. ONU (1992) *Cumbre para la Tierra*. <https://www.un.org/es/index.html>
6. ONU (2000) *Cumbre del Milenio*. <https://www.un.org/es/index.html>
7. ONU (2022) *Cumbre de Johannesburgo*. <https://www.un.org/es/index.html>
8. ONU (2015) *Acuerdo de París Lucha contra el cambio climático*. <https://www.un.org/es/index.html>
9. Ministerio de derechos sociales (2015) *Estrategia de desarrollo sostenible 2030*. <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/>
10. ONU (1999) *Pacto mundial de las Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/index.html>
11. Sabatés, D (2022) *Barreras de la construcción sostenible en España*. <https://itec.es/infoitec/sostenibilidad/barreras-de-la-construccion-sostenible-en-espana/>, 11/10/2022.
12. ONU (2022) *Cambio climático y medioambiente*. <https://news.un.org/es/story/2022/11/1516722>.
13. ONU (2022) *COP 27. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. <https://unfccc.int/es/cop27>, 2022.
14. ONU (2023) *Conferencia de la ONU sobre Cambio Climático - Emiratos Árabes Unidos*. <https://www.un.org/es/index.htm>
15. ONU (2015) (PNUMA) *Informe de la tendencia de la construcción*. <https://www.un.org/es/>
16. BOE-A-2022-9837 and L.c.d. Arquitectura (2022) *La Ley de Calidad de la Arquitectura*. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/06/14/9>

17. J. García Navarr, M.J.G.-D., et. al. (2013) *Sostenibilidad en la construcción*. Instituto de Ciencias de la Construcción, CSIC.
18. Pulido, P.G (2020) *Introducción a la edificación sostenible*. Mundiprensa.
19. BOE (2022) *Ley 7/2022 de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7/con>
20. Deceuninck (s.f) *En Deceuninck apostamos por la economía circular*. <https://www.deceuninck.es/es>
21. ONU (2022) *Tratado internacional sobre el cambio climático*. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>, 2022.
22. Hernandez, R.F. (2023) *Peso del sector de la construcción en el PIB de España 2005-2021*. <https://es.statista.com/>
23. Nieto, A.F.M. (2016) *Guías cortas de Materiales de construcción*. SlideShare from Scribd.
24. Ashby, M.F. and D.R. Jones (2012) *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*. Vol. 1. Elsevier.
25. Heras, M.G. (2013) *Historia del Vidrio*. Cyan Proyectos Editoriales.
26. Díaz-Guerra Pérez J, M.S.M. (2019) *Materiales de construcción.Ligantes,yeso y cal. Madrid (España)*.
27. Sanz Arauz, D.S.A (2022) *El yeso en la arquitectura histórica*. UPM PRESS
28. Brandon, C.J., et al.(2014) *Building for eternity: the history and technology of Roman concrete engineering in the sea*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvh1dvk5>
29. Blázquez, V.M. (2018) *Información de ingeniería y ciencias de los materiales metálicos*. DEXTRA.
30. Sanjuán Barbudo, Chichón Yepes,M (2014) *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. <http://publicaciones.ua.es/publica/ficha.aspx?fndCod=LI9788497173056>
31. Austria, F.M.R.(s.f) *World Mining Data*. <https://www.world-mining-data.info/>
32. Gárate Rojas, I (1999) *Artes de los yesos,yeserías y estucos*. Munillalera.
33. Rollefson, G.(1990) *The uses of plaster at Neolithic 'Ain Ghazal, Jordan*. *Archeomaterials* 4;33-54.
34. Santos, L.d.V.D.A.G. (2021) *Manual del yeso*.Dossat.

35. La Spina, V.G.G., C.J (2020) *La diversidad tipológica de los hornos tradicionales de calcinación de yeso en España.* . Informes de la construcción 72, 2020. 557 <https://doi.org/10.3989/ic.71670>.
36. Villanueva, L. (2004) *Evolución histórica de la construcción con yeso. Informes de la construcción.*,. CSIC 5-11 493. <https://doi.org/10.3989/ic.2004.v56.i493.434>.
37. Sanz-Arauz, D.(2009) *Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas.* (Tesis doctoral,Universidad Politécnica de Madrid,España).<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.1711>
38. *UNE-EN 13279-1:2009 (2009) Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.*
39. Kuntze, R.A (2006) *The chemistry and Technology of Gypsum.* ASTM Comitte C-11 Special Technical publication.<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.05.005>
40. Construcción, D (2024) *Definiciones y traducciones.* <https://www.parro.com.ar/definicion-de-aditivo>,
41. AENOR (2018) *Reglamento para conglomerantes a base de yeso para la construcción (A) Escayolas E30, E35 y E30P.*
42. UNE-EN 16572:2016 (2016) *Conservación del patrimonio cultural. Glosario de términos técnicos relativos a morteros para albañilería, revocos y enlucidos empleados en patrimonio cultural.*
43. Greenpeace.(s.f) *Organización Ecológica Greenpeace.* <https://es.greenpeace.org/es/>.
44. Ministerio de Asuntos Sociales, Consumo y Agenda 2030 (s.f) *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).* www.mdsocialesa2030.gob.es.
45. DC, P.I.A.W.(s.f) <https://www.plasticsindustry.org/>
46. Federation, I.T.(2021) *Report on tennis participation and perfomance worldwide.* <http://itf.uberflip.com/>
47. Federation, I.P.(2023) *Competiciones Fip.* <https://www.padelvip.com/es/documentation/>, 2023.
48. Francia, E.D. (2023) *Decathlon recicla pelotas de tenis para fabricar una línea de chanclas.* <https://comosevende.com/>
49. Green-Ball (s.f) *Valorización energética de las pelotas.* www.Green-Ball.es.
50. Marbella, E (s.f) *Una segunda vida para las pelotas de tenis y pádel.* <https://www.ecomarb.com/sobre-ecomarb/>.

51. Recycleballs (2016). <https://www.recycleballs.org/about-2/>
52. Winball (s.f) *Recicla tus pelotas*. <https://www.winball.es>.
53. Jen, F.(s.f) *Manufacturing process*. <https://www.fjtaiwan.com/>.
54. Food and Agriculture Organization of the United Nations (s.f) *Países productores de caucho*. <https://www.fao.org/home/en>
55. Statista Research Department (2024) *Consumo de caucho natural y sintético a nivel mundial*. <https://es.statista.com/estadisticas/635829/consumo-mundial-de-caucho-natural-y-sintetico/>
56. Fründt, B.G.y.P (1992) *Iniciación a la química de los plásticos*. Hanser.
57. Deportiva, M.d.E.y.F (2023) *Anuario de estadística deportiva*. <https://www.educacionyfp.gob.es/>
58. Jiménez Rivero, A., A. de Guzmán Báez, and J. García Navarro (2014) *New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation*. *Construction and Building Materials*, 55: p. 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>
59. Herrero, S., P. Mayor, and F. Hernández-Olivares (2013) *Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster–rubber mortars*. *Materials & Design*, 2013. 47: p. 633-642. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.063>
60. Serna, Á., et al (2012) *Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres*. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.093>
61. Cura, S.H.D (2016) *Influencia de la dosificación y granulometría del caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) y de las dimensiones físicas en las propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de mortero de yeso-caucho*. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España). <https://oa.upm.es/43070/>
62. Jia, R., Q. Wang, and P. Feng (2021) *A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field*. *Composites Part B: Engineering*, 2021. 205: p. 108540. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108540>
63. Gutiérrez-González, S., et al.(2013) *Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes*. *Construction and Building Materials*,38: p. 407-412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.034>

64. Santos, A.G.J.M.D.C.(2009) *Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido*Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido. 2009: p. 105-124. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.41107>
65. Gencel, O., et al. (2014) *Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results*. Energy and Buildings, 2014. 70: p. 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.047>
66. Gencel, O., et al. (2016) *A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers*. Construction and Building Materials, 113: p. 732-740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.12>
67. Zhu, C., et al. (2018) *Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers*. Construction and Building Materials, 2018. 163: p. 695-705. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.168>
68. Flores Medina, N. and M.d.M. Barbero-Barrera (2017) *Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic graphite filler*. Construction and Building Materials, 2017. 131: p. 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.073>
69. Romaniega Piñeiro, S., M. del Río Merino, and C. Pérez García (2015) *New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling*. Advances in Materials Science and Engineering, p. 854192.<https://doi.org/10.1155/2015/854192>
70. Kuqo, A. and C. Mai (2021) *Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass Posidonia oceanica and pine (Pinus sylvestris) wood fibers*. Construction and Building Materials, 282: p. 122714. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122714>
71. Boccarusso, L., et al.(2020) *Production of hemp-gypsum composites with enhanced flexural and impact resistance*. Construction and Building Materials. 260: p. 120476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120476>
72. Suresh, S.S., S. Mohanty, and S.K. Nayak (2017) *Composition analysis and characterization of waste polyvinyl chloride (PVC) recovered from data cables*. Waste Manag, 2017. 60: p. 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.033>
73. Nazerian, M. and M. Kamyab (2013) *Gypsum-bonded particleboard manufactured from agricultural based material*. Forest Science and Practice, 15: p. 325-331.
74. Tasán Cruz, D.M.(2011) *Caracterización de morteros de yeso reforzados con fibras recuperadas de eslingas textiles de un solo uso*. (Tesis doctoral,Universidad Politécnica de Madrid,España) <https://oa.upm.es/10836/>

75. Guna, V., et al.(2021) *Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance*. Journal of Building Engineering, 41: p. 102433. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102433>
76. Ahmed, A., K. Ugai, and T. Kamei (2011) *Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement*. Construction and Building Materials. 25(1): p. 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>
77. Ramos, F.J.H.T.V. and L.C. Mendes (2014) *Recycled high-density polyethylene/gypsum composites: evaluation of the microscopic, thermal, flammability, and mechanical properties*. Green Chemistry Letters and Reviews, 7: p. 199-208. <https://doi.org/10.1080/17518253.2014.924591>
78. Vidales-Barriguete, A., et al.(2021) *Study of the Mechanical and Physical Behavior of Gypsum Boards with Plastic Cable Waste Aggregates and Their Application to Construction Panels*. 14(9): p. 2255. <https://doi.org/10.3390/ma14092255>
79. San-Antonio-González, A., et al.(2015) *Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour*. Construction and Building Materials, 93: p. 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.040>
80. Bicer, A. and F. Kar (2017) *Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth*. Thermal Science and Engineering Progress, 1: p. 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.02.008>
81. de Oliveira, K.A., C.A.B. Oliveira, and J.C. Molina (2021) *Lightweight recycled gypsum with residues of expanded polystyrene and cellulose fiber to improve thermal properties of gypsum*. Materiales de Construcción. 71(341): p. e242. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.07520>
82. Bouzit, S., et al.(2021) *Gypsum-plasters mixed with polystyrene balls for building insulation: Experimental characterization and energy performance*. Construction and Building Materials. 283: p. 122625. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122625>
83. Cao, W., et al.(2021) *A novel low-density thermal insulation gypsum reinforced with superplasticizers*. Construction and Building Materials. 278: p. 122421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122421>
84. Hernández-Olivares, F., et al.(1999) *Development of cork-gypsum composites for building applications*. Construction and Building Materials. 13(4): p. 179-186. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00021-5)
85. Merino, R. and M. del.(2005) *Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación*. Encuentro Eurocork. <https://oa.upm.es/1896/>

86. Cherki, A.-b., et al.(2014) *Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite*. Construction and Building Materials. 54: p. 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076>
87. Morales-Conde, M.J., C. Rodríguez-Liñán, and M.A. Pedreño-Rojas (2016) *Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works*. Construction and Building Materials. 114: p. 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.137>
88. Marte Rosario, M.(2011) *Cáscara nuez chandler, nuez californiana*. (Tesis doctoral,Universidad Politécnica de Madrid,España).<https://oa.upm.es/10065/>
89. Leiva Aguilera, M.J (2017) *Escayola aditivada con residuos de cáscara de arroz*. (Tesis doctoral,Universidad Politécnica de Madrid,España). <https://oa.upm.es/54716/>
90. Selamat, M.E., et al.(2019) *Comparative study of oil palm trunk and rice husk as fillers in gypsum composite for building material*. Construction and Building Materials. 197: p. 526-532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.003>
91. Sophia, M. and N. Sakthieswaran (2019) *Synergistic effect of mineral admixture and bio-carbonate fillers on the physico-mechanical properties of gypsum plaster*. Construction and Building Materials. 204: p. 419-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.160>
92. Ismail, B., N. Belayachi, and D. Hoxha (2020) *Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster composites using natural additives*. Construction and Building Materials. 254: p. 118959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118959>
93. Arvelo Reynoso, E (2011) *El uso de plumas de pollo para aumentar la tenacidad del yeso*.(Tesis doctoral,Universidad Politécnica de Madrid,España) <https://oa.upm.es/9314/>
94. López-Delgado, A.C.O.M., Jesús CSIC; Alonso, M. P.; Tayibi, Hanan CSIC; Pérez, Carlos CSIC; López Gómez, Félix Antonio (2005) *Estudio del comportamiento térmico del polvo de aluminio estabilizado con el yeso*. Revista de Metalurgia 41 (Nº Extra) : 330-334 . <http://hdl.handle.net/10261/45330>
95. Salim, K., et al.(2019) *Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass*. Procedia Structural Integrity. 17: p. 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.023>
96. Marrero, M., et al.(2013) *Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados*. Informes de la Construcción, 2013. 65: p. 89-97. <https://doi.org/10.3989/ic.11.034>

97. Morsy, M., A. Rashad, and S.S. Shebl (2008) *Effect of elevated temperature on compressive strength of blended cement mortar*. Build Res J. 56: p. 173-185.
98. Alba, M.D., Marrero, M., Leiva, C., Montes, M. V., & Vilches (2012) *Empleo de paneles compuestos por subproductos de centrales térmicas en fachadas trasdosadas*. Informes De La Construcción, 64(526), 179.
<https://doi.org/10.3989/ic.10.042>
99. Binici, H. and O. Aksogan (2017) *Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum*. Materials Today Communications. 10: p. 14-24.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.09.004>
100. Jiang, J., et al.(2019) *Preparation and hardened properties of lightweight gypsum plaster based on pre-swelled bentonite*. Construction and Building Materials. 215: p. 360-370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.181>
101. Ding, X., et al.(2020) *Utilization of collagen protein extracted from chrome leather scraps as a set retarders in gypsum*. Construction and Building Materials. 237: p. 117584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117584>
102. Serhat Başpınar, M. and E. Kahraman (2011) *Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules*. Construction and Building Materials. 25(8): p. 3327-3333.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.022>
103. Khalil, A.A., et al.(2013) *Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites*. Materiales de Construcción, 63(312): p. 529-537. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.04312>
104. Balti, S. et al (2024) *Advancing reinforcement of sustainable gypsum composites: High-performance design by reusing waste materials*. Materials Today Sustainability. 27: p. 100946. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100946>
105. Santos Jiménez, R.(2018) *Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles* (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (España). <https://oa.upm.es/53564/>
106. Beldjilali, S., et al.(2020) *Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick*. Construction and Building Materials. 259: p. 120416.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120416>
107. Sáez, P.V., et al.(2019) *Viability of Gypsum Composites with Addition of Glass Waste for Applications in Construction*. 31(3): p. 04018403.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000260)

108. Erbs, A., et al.(2018) *Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles*. Journal of Cleaner Production, 183: p. 1314-1322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.189>
109. Romero-Gómez, M.I., et al.(2021) *Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes*. Journal of Building Engineering. 34: p. 101874. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101874>
110. Morales-Segura, M., et al.(2020) *Characterization of Gypsum Composites Containing Cigarette Butt Waste for Building Applications*. 12(17): p. 7022. <https://doi.org/10.3390/su12177022>
111. García-Martínez, A.(2010) *Análisis del ciclo de vida (ACV) de edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Viviendas en Andalucía*. (Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla (España)). <http://hdl.handle.net/11441/23929>
112. Fořt, J., Černý, R.(2020) *Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios*. Waste Management, 118, 510-520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.004>
113. Fořt, J., Černý, R.(2018) *Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic*. Journal of Cleaner Production, 177, 795-802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.002>
114. Pedreño-Rojas, M.A., Fořt, J., Černý, R., Rubio-de-Hita, P.(2020) *Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context*. Journal of Cleaner Production, 253, 120056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>
115. Pedreño-Rojas, M.A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rubio-de-Hita, P.(2019) *Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study*. Journal of Cleaner Production. p. 218, 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.200>
116. Romero-Gómez, M.I., Silva, R. V., de Brito, J., Flores-Colen, I.(2023) *Prototype of alveolar gypsum blocks with plastic waste addition for partition walls: Physico-mechanical, water-resistance and life cycle assessment*. Journal of Cleaner Production, 177, 795-802. 432, 139810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139810>
117. Pedreño-Rojas, M.A., Flores-Colen, I., De Brito, J., Rodríguez-Linán, C (2019) *Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis*. Journal of Cleaner Production, 177, 795-802., (2019): p. 215, 444-457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>

118. Rodrigo Bravo, A.A.C.-R., Lourdes; Calderón Carpintero, Verónica; Rodríguez Sáiz, Ángel; Gutiérrez González, Sara [et al.] (2022) *Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile*. RIARTE. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867>
119. Rodrigo-Bravo, A., Cuenca-Romero, L. A., Calderon, V., Rodriguez, A., Gutiérrez-González, S.(2022) *Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile*. Energy and Buildings, 259, 111867. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867>
120. UNE-EN 13279-2:2014.(2014) *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo*.
121. UNE-EN 933-1:2012 (2012) *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*.
122. UNE-EN 13925-3:2006 (2006) *Ensayos no destructivos. Difracción de rayos X aplicada a materiales policristalinos y amorfos*. .
123. UNE-EN 102042:2014 (2014) *Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo*.
124. UNE-EN 12667, (2002) *Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor*.
125. UNE-EN 102042:2014 (2014) *Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo*
126. UNE-EN 520:2005 (2005) *Placas de Yeso Laminado: Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*.: p. 26.
127. Serrano, K., et al.(2016) *Serrano et al 2016 Ann Fam Med*.
128. Vidales-Barriguete, A., et al.(2021) *Behavior resulting from fire in plasterboard with plastic cable waste aggregates*. Journal of Building Engineering. 40: p. 102293. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102293>
129. UNE-EN 14246 (2006) *Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*.
130. Instituto Nacional de Estadística (2011) *Censo de Población y Viviendas, in Ideas Propias, España*. Madrid.
131. Gobierno de España (2015) *Anuario estadístico*.Ministerio de Fomento.

132. Gobierno de España (2016) *Construcción de edificios 2011-2015. Datos recogidos de las licencias de obra concedidas por los Ayuntamientos*. Ministerio de Fomento.
133. Real Decreto 314/2006 (2006) *Se aprueba el Código Técnico de la Edificación.*, M.d. vivienda, BOE.
134. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja and Instituto de la Construcción de Castilla y León. *CTE WEB (2007) Código técnico de la edificación web*. Available from: <http://cte-web.iccl.es>.
135. Crawley, D.B., et al.(2001) *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings1. **33**(4): p. 319-331.
136. Dahanayake, K.W.D.K.C. and C.L. Chow (2017) *Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program*. Energy and Buildings. **138**: p. 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.002>
137. Zhang, R., et al.(2013) *Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation*. Building and Environment. **68**: p. 100-113. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.002>
138. Mateus, N.M. and G. Carrilho da Graça (2017) *Simulated and measured performance of displacement ventilation systems in large rooms*. Building and Environment. **114**: p. 470-482. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.002>
139. Design Builder Simulation and CFD Training Guide, *DesignBuilder Software Ltd*. 2017: London.
140. Porras-Amores, C., et al.(2021) *Assessing the Energy Efficiency Potential of Recycled Materials with Construction and Demolition Waste: A Spanish Case Study*. Applied Sciences. **11**. <https://doi.org/10.3390/app11177809>.
141. Mesquita, C.A.C (2012) *Revestimientos Continuos Interiores de Varias Capas con Características de Barrera de Vapor e Higroscopicidad*. (Tesis doctoral,Universidad Politécnica de Madrid,España). <https://oa.upm.es/14898/>
142. Pedreño-Rojas, M.A., et al.(2017) *Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste*. Journal of Cleaner Production. **166**: p. 690-705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>

TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

Artículo de investigación:

1. **Marta Rodríguez Aybar, César Porrás-Amores, Esther Moreno Fernández & Álvaro Pérez Raposo.** “Physical-mechanical properties of new recycled materials with additions of padel-tennis ball waste”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 413 (2023), 137392. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137392. Posición revista: **Q1 - JCR/SJR**

Propiedad industrial:

2. **Marta Rodríguez Aybar, M^a Esther Moreno Fernández y César Porrás Amores.** “Material de construcción y panel de dicho material de construcción”. ES-1300512U. Prioridad España. Fecha de concesión: 20.06.2022, Titular: Universidad Politécnica de Madrid.

Premios:

3. Galardonada con el 2º premio en el Simposio de Doctorado UPM 2024 “Tu tesis en 3 minutos”.

Congresos de investigación:

4. **M. Rodríguez Aybar; C. Porrás Amores; E. Moreno Fernández.** “Study of the physical-mechanical characteristics of plaster with paddle ball residues”. Poster. *Building and Management International Conference (BIMIC2021)*. Proceedings Book BIMIC2021. ISSN/ISBN: 978-84-09-37217-1. Madrid, España. 24/11/2021
5. **M. Rodríguez Aybar; Á. Pérez Raposo; C. Porrás Amores; E. Moreno Fernández.** “Statistical study of mechanical properties of plaster employing new waste materials from discarded tennis & Padel tennis balls”. Poster. *International Conference on Technological Innovation in Building (CITE2022)*. Proceedings Book CITE2022. ISSN/ISBN: 978-84-18255-41-0. Madrid, España. 23/03/2022.
6. **M. Rodríguez-Aybar; M. Alejandro Pedreño-Rojas; C. Porrás-Amores; E. Moreno Fernández.** “Study of the mechanical behavior of plaster with polyamides”. Oral. *International Conference on Technological Innovation in Building (CITE2023)*. Proceedings Book CITE2023. ISSN/ISBN: 978-84-18255-50-2. Madrid, España. 23/03/2023.
7. **M. Rodríguez Aybar; A. Pedreño Rojas; C. Porrás-Amores; E. Moreno Fernández.** Recycled materials with vulcanized rubber waste. Poster. *II National and I International Congress of Advanced Schools Buildings Engineering and Technical Architecture (EDIFICATE)*. Proceedings Book EDIFICATE. ISSN/ISBN: 978-84-338-73064. Granada, España. 10/11/2023.

ANEJOS

ANEJOS

Este apartado recoge algunos de los principales resultados obtenidos durante la investigación desarrollada en la tesis doctoral.

➤ **ANEJO 1: Publicaciones derivadas de la tesis**

- A) Artículo de Investigación
- B) Propiedad Industrial.
- C) Premios.
- D) Congresos de Investigación.

➤ **ANEJO 2: Análisis Estadístico**

A.1: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

A) Artículo de investigación.

2023. Journal of Cleaner Production, Vol. 413, 137392.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Check for updates

Physical-mechanical properties of new recycled materials with additions of padel-tennis ball waste

Marta Rodríguez Aybar^a, César Porras-Amores^{b,*}, Esther Moreno Fernández^c, Álvaro Pérez Raposo^d

^a Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera, 6, 28040, Madrid, Spain
^b Grupo de Investigación Tecnología Edificatoria y Medio Ambiente, Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera, 6, 28040, Madrid, Spain
^c Grupo de Investigación Análisis e Intervención en Patrimonio Arquitectónico, Departamento de Construcción y tecnología Arquitectónicas, Escuela Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera, 4, 28040, Madrid, Spain
^d Grupo de Investigación Acústica Arquitectónica, Departamento de Matemáticas Aplicada, Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Juan de Herrera, 6, 28040, Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Handling Editor: Jian Zuo

Keywords:
Gypsum
Recycling
Rubber
Padel-tennis ball
Circular economy

ABSTRACT

Around 320 million new padel and tennis balls are used worldwide each year, the game of padel also being known as padel or padel tennis. This level of use of padel-tennis balls is estimated to produce approximately 21,000 metric tons of waste from the balls, which are manufactured with a vulcanized natural rubber core covered with felt. Considering how plaster has been one of the most widely used materials in the construction sector, with excellent aesthetic and mechanical properties for indoor use, this research aims to assess the physical and mechanical properties of new recycled materials with the addition of padel-tennis waste. Several plaster mixtures were made using different residues from balls (felt and rubber), previously crushed, according to different ratios of water to gypsum and percentages. The statistical analysis indicates the representativeness and robustness of the results with a very high adjustment of the calculated models (coefficients of determination R^2 greater than 98%). Also, it corroborates that density is a determining factor in the mechanical properties of plasters for the three types of residues studied and it is a key parameter in the design of those construction elements that require lightness properties. The results confirmed that the new recycled material complies with the minimum requirements established under the UNE-13279 building standard, and even the flexural strength increases by up to 20% when felt waste is used. Mechanical properties (flexure and compressive) increase more intensely when the surface hardness exceeds the value of 60 units. The water absorption and surface hardness also meet the standards, so the innovative material would be suitable for the manufacture of pre-cast panels, such as suspended ceiling plates or interior cladding walls, as well as any other construction element that is currently made from gypsum, thus optimising sustainability and the circular economy in the construction sector. The new innovative material includes the benefits of secondary raw materials and the problem of padel-tennis waste disposal.

1. Introduction

Since 1974 World Environment Day has been celebrated annually on June 5, a day when the United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO) urges governments and organizations of the United Nations to carry out global activities to reaffirm their commitment to the preservation and protection of the environment in the promotion of environmental awareness. In this sense, the Spanish Council of Ministers approved the Spanish Circular Economy Strategy and Action Plans on February 2020 (Consejo de Ministros, 2020), where the environmental goals for the next decade were addressed under the banner of "Spain Circular 2030". Among the initiatives proposed for Spain for 2030, it can be highlighted that all material use nationally targets a reduction of 30%, with a cut of 15% in waste generation (taking

* Corresponding author.
E-mail addresses: marta.rodriguez@upm.es (M. Rodríguez Aybar), c.porras@upm.es (C. Porras-Amores), esther.moreno@upm.es (E. Moreno Fernández), alvaro.praposo@upm.es (Á. Pérez Raposo).

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137392>
Received 11 December 2022; Received in revised form 20 April 2023; Accepted 4 May 2023
Available online 11 May 2023
0959-6526/© 2023 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

2010 as the base year), and a 10% improvement in water use efficiency. It is carried out through three-year action plans that include specific measures to implement actions in the circular economy. The law on waste and contaminated soils for a circular economy includes all the above (Boletín oficial del Estado, 2022).

In this scenario, gypsum-based products are known as environmentally friendly materials and remain one of the most common mineral binders. Compared to cement-based mortars, gypsum offers several advantages, such as the possibility of being manufactured locally. Furthermore, gypsum is energy efficient, as its calcination occurs at lower temperatures compared to cement or lime, reducing fuel consumption and CO₂ emissions (Mayo-Corrochano et al., 2022). The many existing studies on construction materials that incorporate waste to develop sustainable and recycled materials, come from many different sectors, such as the wood and lumber industry (Hernández-Olivares et al., 1999), (Merino and del, 2005), (Cherki et al., 2014), (Morales-Conde et al., 2016), (Kuço and Mai, 2021), agriculture (Marrero et al., 2013), (Selamat et al., 2019), (Boccarusso et al., 2020), (Suresh et al., 2017), (Sophia and Sakthieswaran, 2019), (Ismail et al., 2020), (De Lucia et al., 2021), (Guna et al., 2021), packaging (Ramos and Mendes, 2014), (Romero-Gómez et al., 2022) construction (Santos Jiménez, 2018), (Erbs et al., 2021), (Sáez et al., 2019) and textiles (Arvelo Reynoso, 2011; Gencel et al., 2014), municipal (Cozzarini et al., 2020) among others. Among the multiple properties of the materials, the mechanical and physical properties are the most important in the preliminary stages of the development of the product because they can give an idea of its potential. The work of Mercedes et al. (Del Río-Merino et al., 2022) gives an overview of the mechanical characterization of gypsums containing waste by analyzing 97 references, highlighting the importance of this binder in the development of new construction materials.

Among the materials incorporated into plaster, it is worth noting the ground tire rubber (GTR) waste resulting from used tires. A study by Herero et al. (2013) investigated the behavior of plaster and mixtures that incorporate up to 60% GRT waste, concluding that the incorporation of these residues improves the acoustic and thermal properties of plaster. The results showed that the more rubber is added and the larger the size of the rubber particles, the lower the workability and homogeneity of the compound, and therefore the lower the mechanical properties. Serna et al. (2012) also used rubber residue in their experiments, resulting in the addition of rubber to gypsum mixtures, decreasing the flexural strength by 16% and the compressive strength by 18%. However, the mechanical strength values remain above the thresholds required by the building standard (UNE-EN-13279-2, 2014). This work also highlights the decrease in the surface hardness of the plaster, which acquires a shade of darker colour. Furthermore, rubber waste from insulating shells has been incorporated (Rivero et al., 2011) where they conclude that the higher the percentage and size of the rubber particle, the Shore hardness, the density, and the mechanical strength decrease considerably due to the formation of micropores.

In other line, there are numerous studies that incorporate fibres of a different nature (natural, plastic, textiles, etc.) into plaster-based materials to improve the mechanical properties of the compound. Regarding natural fibers, the study carried out by Leiva et al. (Marrero et al., 2013), shows that rice husk residues incorporated into gypsum matrices decrease mechanical properties, increase hardness and toughness, and improve water absorption performance. Mohd et al. (Selamat et al., 2019) tests gypsum mixtures using rice husk with the addition of palm oil waste. It is observed that the setting times (start and final of the setting interval) decrease when oil palm is added. In contrast, the mechanical properties obtained with the palm waste were much higher than those obtained with other material (both wastes mixed with plaster show improved fire resistance behavior improved). Another study by Boccarusso et al. (2020) uses hemp fibers (from earlier research) and adds epoxy resin to measure the properties of flexural and impact resistance. It concludes that resin-impregnated fibers have better

adhesion to plaster and improve the flexural and impact resistance qualities compared to fiberboards without primer, and even to plain plasterboard. Suresh et al. (2017) in their research also asserts that by adding hemp fiber residues, flexural/compressive strength is improved, as well as thermal insulation properties. Finally, Guna et al. (2021) tested a material made of plaster, coconut fiber, and wool, obtaining very good results in terms of resistance to water absorption, sound insulation, and fire. The best results were obtained with wool fibers rather than coconut fibers.

In the case of experiments that incorporate recycled plastic fibers, the polypropylene (PP) fiber of wet wipes is prominent (Romero-Gómez et al., 2021). In this trial, the dry density of the plaster decreases with the increasing addition of PP fibers obtained from the discarded wet wipes. However, despite this reduction in mechanical strength, this plaster composite still meets the required limits. Regarding adhesion, no significant changes were observed. In addition, polyethylene fibers from plastic bottle waste (Ramos and Mendes, 2014), where the waste acted as waterproofing of gypsum and provided the mechanical properties to gypsum. The gypsum content improved the thermal stability and flammability of the waste. Finally, polyamide fibers (PA) (Gutiérrez-González et al., 2012) have better results for the use of the mixture in stuccoes when a ratio of 0.5 gypsum/polyamide is used, because with higher ratios the plaster setting is slower, as well as the viscosity and workability of the compound. Regarding research that incorporates fibers from the textile industry, the use of sling residue (Tasán Cruz, 2011) is notable. With an increasing percentage added to the plaster, there is an increase in flexural strength. However, the density and Shore hardness decrease, possibly due to air bubbles that can form between these fibers. Another study (Romaniega Piñeiro et al., 2015) shows that the incorporation of mineral wool fibers from insulating materials provides a high Shore hardness when added at a rate of 4%. Furthermore, it increases the flexural strength by 34.9% compared to the sample without addition and 26.6% the compressive strength. Finally, it worth mentioning the cellulose residue fibers from cigarette filters (Morales-Segura et al., 2020) by using cigarette filter waste to develop a composite material that improves the superficial hardness, mechanical strength and density of the plaster without additions. Table 1 summarizes the type of residue used and the main research contributions from various investigations using fiber or rubber waste in gypsum matrices.

As indicated above, there are several studies that incorporate synthetic rubber waste (from tires and insulating shells) into a plaster matrix. However, no studies have been found that analyze the incorporation of natural rubber and, more specifically, vulcanized natural rubber from padel-tennis balls. In general, previous studies have shown that the incorporation of rubber in gypsum compounds results in a reduction in mechanical strength, so it is considered necessary to analyze new alternatives to improve its strength, such as with the addition of recycled fibers. Additionally, the majority of wastes studied in gypsum matrices tend to decrease the mechanical properties of the compound, making this a limiting factor in the final applications of the product. For this reason, this research aims to find specific dosages of plaster compounds with additions of padel ball fibers that allow the final strength to be improved so that it can be used in certain applications with minimal mechanical requirements.

About 30 million padel/tennis balls are used in Spain yearly, generating about 2000 metric tons of waste each year, which is difficult to dispose of in an eco-friendly fashion. This high demand signals the need to develop a strategy to dispose of the waste generated by these balls at the end of their useful life. There are companies which collect this waste and recover them to produce flip-flops (e.g., Decathlon company); for energy valorization (e.g., Green Ball company (Green ball, 2022)) to make new sustainable sports products (e.g., SecondSet company), as filaments for use in 3D printing (e.g., EcomarB company (EcomarB, 2022)) or as recycled material in the construction of new tennis courts or horse footing (e.g., Recycleballs company (Recycle balls, 2022)). The Green-Ball firm (Gong et al., 2012), incinerates balls taking

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

Table 1
Summary of research studies using fiber or rubber waste in gypsum compounds.

Author	Waste	Research findings
Selamat et al. (2019)	Palm trunk and rice husk fibers	Reduction of setting times (rice husk). Increase in mechanical properties (palm). Good behavior to fire (both)
Boccarusso et al. (2020)	Hemp fabric fibers	Improved adhesion and flexural strength, especially with hemp-epoxy fibers. Also, it reduces cracking against impact
Guna et al. (2021)	Wool and coir fibers	Increase in mechanical properties by up to 90%. Improvement (V0 to V1) of fire resistance with any of the fibers
Ramos and Mendes (2014)	Polyethylene fibers	The gypsum-fiber composite reduced the burning rate. Fibers acted as waterproofing of gypsum and provided the mechanical properties to gypsum
Romero-Gómez et al. (2021)	Polycarbonate fibers	Increase in bending strength by 19% compared to reference
Gutiérrez-González et al. (2012)	Polyamide fibers	Decrease in mechanical properties and density and increase in permeability and thermal resistance properties with a high percentage of residue
Tasán Cruz (2011)	Textile sling fibers	With higher percentage of fibers, the tensile strength increases and the density and hardness Shore decrease
Romaniega Piñeiro et al. (2015)	Wool fibers	Good compatibility between waste-plaster matrix. Despite the difficulties of mineral wools in absorbing water, its distribution is homogeneous in samples
Morales-Segura et al. (2020)	Cigarette butt waste	Mechanical properties increase to 8% (flexural) and 9% (compressive) with a percentage of 1.5 of fibers
Mamiński et al. (2011)	Mineral wool with wood	The incorporation of the residue reduces the flammability and mechanical properties
Deng and Faruno (2001)	Polycarbonate fibers	12 mm fibers in amounts of 12% or 3 mm in amounts of 9% increase the mechanical properties of the compounds
Gençel et al. (2014)	Vermiculite and Polypropylene	The increase of diatomite decreases the thermal conductivity. Polypropylene fibers increase mechanical properties up to 15%
Alameda et al. (2016)	Polyurethane, polypropylene	Polypropylene and polyurethane fibers provide, high compressive strength (>2 MPa) and a reduction in thermal conductivity (33%) and material weight (31%)
Herrero et al. (2013)	Rubber tires	Decrease in density (30–40%) and increase in mechanical, acoustic and thermal resistance.
Serna et al. (2012)	Rubber tires	Rubber particles reduce bending (16%), compressive (18%) strength, and surface hardness. Also gives it a dark color hue.
Jiménez Rivero et al. (2014)	Rubber (pipe foam)	When the length and amount of waste are increased, the mechanical properties and density decrease
Taher et al. (2014)	Rubber tires	The thermal conductivity of the compound is around 18–38% compared to that of traditional gypsum, regardless of the particle size

advantage of their energy value – rubber has a good calorific value as a source of energy – transforming it back into energy and thus helping to reduce fossil fuel consumption. This solution has the drawback of the degree of CO₂ pollution that occurs in combustion. Another company, Winball (Willball, 2022) (Li et al., 2012), recovers the pressure that is lost inside the vulcanized rubber core of the balls by normal use. In this sense, no previous studies have been found that analyze the use of tennis or padel ball waste for the development of new building recycled materials. This research aims to incorporate this ball waste into the circular economy, discovering and developing a new plaster-based composite to be manufactured as UNE-13279 standard-compliant construction material for the benefit of builders and the well-being of the general public.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Gypsum plaster is one of the most widely used materials and has a long tradition in the construction industry. The tennis/padel ball waste comprises a vulcanized natural rubber core covered with felt composed of 37% polyamide fiber, 13% cotton, and 50% animal wool. All these components are non-recyclable materials and are classified as “nonhazardous industrial waste”. The composition and technical characteristics of the balls vary depending on the manufacturing process of the supplier and its final use. Given the existing variability, it is convenient to clarify that residues of regulatory balls have been used in this research, following the requirements established by the international padel federation. Other padel-tennis balls waste might be further analyzed and this has been incorporated as a future research line in the conclusions.

A Gypsum E–35 (E), classified as type A according to UNE EN 13279-1 (UNE-EN-13279-1, 2009), supplied by the company Saint-Gobain Placo Ibérica for laboratory test was used. The PS-G technical data sheet lists the following product specifications: purity index >90%; grain size 0–2 mm; flexural strength 3 N/mm²; and thermal conductivity 0.30 W/mK.

The water used complies with the technical characteristics established by UNE EN13279-2.

The waste is classified according to its origin and composition, as shown in (Fig. 1):

- Vulcanized rubber waste (R) from excess rubber foil material used in the ball manufacturing process. Rubber residue cannot be recovered within the production cycle because it has become a different material with altered thermostable characteristics (now thermolabile). Manufacturers need to find new ways of using it, and this is the line of the present investigation.
- Felt waste (F) from excess material from the polyamide sheet used in the ball manufacturing process. This residue can be incorporated into the production of new felts as a secondary raw material.
- Mixture of rubber and felt (RF) from the crushing balls once the balls are no longer in use due to deterioration.

In all cases, a waste particle size of 5 mm was used due to the low-cost mechanical crushing process of the system.

2.2. Lab test sample preparation

A total of 102 samples of 40 mm × 40 mm x 160 mm were used according to the procedure indicated in the UNE-EN 13279-2 (UNE-EN-13279-2, 2014), ranging in four series of tests. The three plaster ratios (w/g for water-to-gypsum) by weight used in the mixture were w/g = 1; w/g = 0.8; and w/g = 0.7 following the manufacturer's recommendations.

Waste percentages were incorporated into the gypsum matrix based on the findings of previous research works (Jiménez Rivero et al., 2014),

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

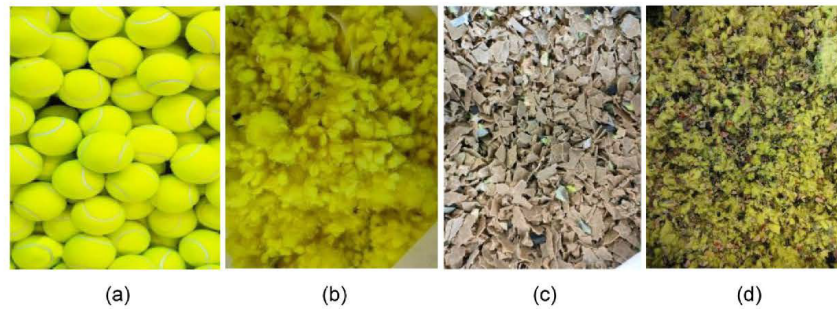


Fig. 1. (a) Tennis-padel balls; (b) Felt residue; (c) Rubber residue; (d) Crushed felt & rubber from ball waste.

(del Rio Merino et al., 2023), (Romaniega Piñeiro et al., 2015). In this way, samples containing 5% (Low), 7% (Medium) and 10% (High) of Felt; and 10% (Low), 14% (Medium), and 20% (High) of rubber and rubber & felt were performed. In all the cases, when surpassing 10% of waste addition in mixtures containing F and 20% in those containing R or R + F the workability decreased considerably and became unfeasible. Therefore, additives will be needed if the percentage of waste is increased.

Furthermore, several reference samples without waste were manufactured for each water/gypsum ratio to assess the results by comparing them with the baseline values.

Table 2 summarizes the samples according to the water/gypsum ratio; type of waste and percentage of waste.

Table 2
Summary of samples according to water/gypsum ratio, type of waste and percentage of waste.

SERIES	COMPOUNDS	WATER/ GYPSUM RATIO	WASTE TYPE	PERCENTAGE OF WASTE (%)
#0	Ref. 1	1	Plaster	0
	Ref. 0.8	0.8		
	Ref. 0.7	0.7		
#1	1-R-L	1	Rubber (R)	10
	1-R-M			14
	1-R-H			20
	0.8-R-L	0.8	10	
	0.8-R-M		14	
	0.8-R-H		20	
	0.7-R-L	0.7	10	
	0.7-R-M		14	
	0.7-R-H		20	
	#2	1-RF-L	1	Rubber&Felt (RF)
1-RF-M			14	
1-RF-H			20	
0.8-RF-L		0.8	10	
0.8-RF-M			14	
0.8-RF-H			20	
0.7-RF-L		0.7	10	
0.7-RF-M			14	
0.7-RF-H			20	
#3		1-F-L	1	Felt (F)
	1-F-M		7	
	1-F-H		10	
	0.8-F-L	0.8	5	
	0.8-F-M		7	
	0.8-F-H		10	
	0.7-F-L	0.7	5	
	0.7-F-M		7	
	0.7-F-H		10	

2.3. Experimental procedure

The sample preparation and experimental tests were carried out in the Building Materials Laboratory of the Escuela Técnica Superior de Edificación of the Universidad Politécnica de Madrid in Spain. Physical-mechanical characterization was obtained by estimating the following parameters:

- Apparent density according to UNE-EN 1936 (UNE-EN-1936, 2007). Once the test pieces have been made, they are immediately weighed to record their wet weight. Then they were left for seven days in the laboratory with an ambient temperature of $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ with humidity around $50\% \pm 5\%$. At the end of this interval, the samples were then oven dried at $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ for 24 h and weighed to determine their dry weight.
- Surface hardness, SHORE C, according to UNE 102042 (UNE-102042, 2014), taking the reading of the pressure exerted with the durometer in ten different zones of each sample (5 points on each side) and taking the mean as the final value.
- Flexural and compressive strength according to UNE-EN 13279-2, using specimens of standard dimensions ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) supported on separate rollers 100 mm. The force required to break them is determined when a constant speed centre-directing force is applied. The flexural strength (FS) is calculated in N/mm^2 using the formula (equation (1)):

$$FS = 0.00234 * L \quad (1)$$

where L is the break load in Newtons. The result is expressed as the average flexural strength of at least three test pieces. The compressive strength is measured by breaking six half-samples obtained in the flexural test calculated by the equation (2):

$$CS = \frac{L}{1600} \quad (2)$$

where CS is the compressive strength in N/mm^2 and L is the average breaking load of the six semi-test pieces in Newton. The load area is 1600 mm^2 . Both flexural and compressive tests were performed with an Autotest 200-10SW instrument from Iberest connected to digital control equipment.

- Water absorption according to an experimental process by adapting the standard UNE-EN 520 to the measurement of water absorption on plasterboard (UNE-EN-520, 2005+A1). Three prismatic samples of $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ were made with a water-gypsum ratio of 0.7 and a 1.4% rubber waste admix, another three samples with a w/g = 0.7 and a 1.4% rubber & felt admix; and three more samples with a ratio w/g = 0.7 and a 7% felt admix. The percentage of felt waste has

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

been reduced to 7% (half compared to rubber waste and mixed waste) due to its high water absorption, which considerably decreases the workability of the paste. In addition, three more waste-free reference samples without waste were manufactured to assess the results compared to the baseline values.

The experimental tests focused on analyzing the essential mechanical properties (compressive, flexural, and surface hardness) and physical properties (density and water absorption) properties to verify if the new recycled material meets the minimum regulatory requirements for the manufacture of pre-cast panels, such as suspended ceiling plates or interior walls. cladding. Fig. 2 shows the stages of the experimental process in the laboratory.

To justify some of the results achieved during the mechanical characterization of the new composites, a microstructural analysis, using a FEI TENE0 scanning electron microscope, was conducted. Thus, apart from the reference sample, mixtures with 0,5 water/gypsum ratio and 14% aggregate were examined (0.5-R-14; 0.5-RF-14; 0.5-F-14).

2.4. Statistic analysis

After the experimental phase, a statistical analysis of the data was performed with the following goals: 1) verify the representativeness and robustness of the experimental data; 2) compare the significance of the variables under control in the experiment with regard to the mechanical properties of the test specimens; 3) evaluate the residual variance of a model based on the variables under control to understand their combined role in the mechanical properties; 4) study other possible relations among the measured variables, which may or may not be related to the variables under control; and finally 5) assess the diagnosis of the hypotheses of this analysis to verify its self-coherence.

The analysis was performed with R software, a free open-source software environment for statistical computing and graphics. The explanatory variables are shown in Table 2: water/gypsum ratio ($w/g = 1, 0.8$ and 0.7); waste type (without waste; rubber; felt; rubber & felt); and amount of waste (low, medium, and high). The results measured for each test piece were flexure strength (MPa); compressive strength (MPa); and Shore hardness (scale C). In each case, a three-way ANOVA was performed in which the main effects of each factor and the interactions up to the third order were considered. As a result of each

analysis, the ANOVA table with the relevance of each factor, the residual deviation of the model, and the coefficient of determination R^2 were obtained. All tests were evaluated using a p-value with the usual criterion: the result is statistically significant whenever $p < 0.05$. In addition, a corresponding diagnosis of the model hypotheses is attached to each analysis using a residue graph and a normal residue quantile graph (normal Q-Q plot).

3. Results and discussion

3.1. Physical-mechanical behavior

• Density

Fig. 3 shows density with different percentages; water/gypsum ratios and types of waste.

Density values slightly increased when rubber-felt waste (RF) was included in the compounds, whereas when rubber residues (R) and felt (F) were used, the density decreases minimally with respect to their references. The density values of gypsum mixtures with different residues and the same water dosage are similar; however, they decrease as water is incorporated into their composition. The lowest density is obtained with compound 1/R/M (0.78 g/cm^3) while the maximum is reached with 0.7/RF/L (1.12 g/cm^3), 40% more.

The Fig. 4 shows the values of density versus flexural/compressive strength and superficial hardness with different water/gypsum ratios.

The values indicate that the mechanical properties (flexural, compressive, and superficial hardness) of the analyzed compounds increase progressively with increasing density and decreasing w/g ratio. This trend follows the same pattern identified by research carried out by Santa Cruz Astorqui (Santa Cruz Astorqui et al., 2017), in which the relationship density/mechanical properties in lightened gypsums was analyzed.

• Water absorption

With respect to the results of water absorption, it is observed that the values decrease when part of the plaster is replaced by less absorbent wastes. The absorption of the samples without waste at 5 h is 39%, while in the samples with waste it is 35%, an average improvement of 4



Fig. 2. Stages of the experimental process in the laboratory.

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

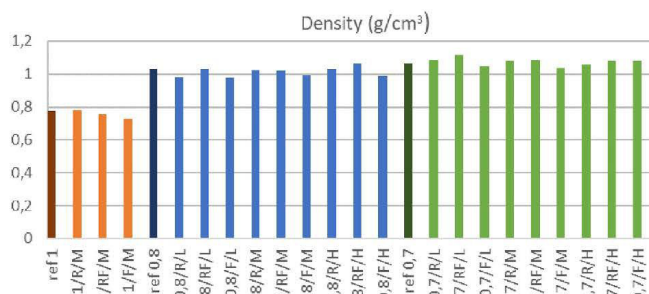


Fig. 3. Density with different percentages; water/gypsum ratios and types of waste.

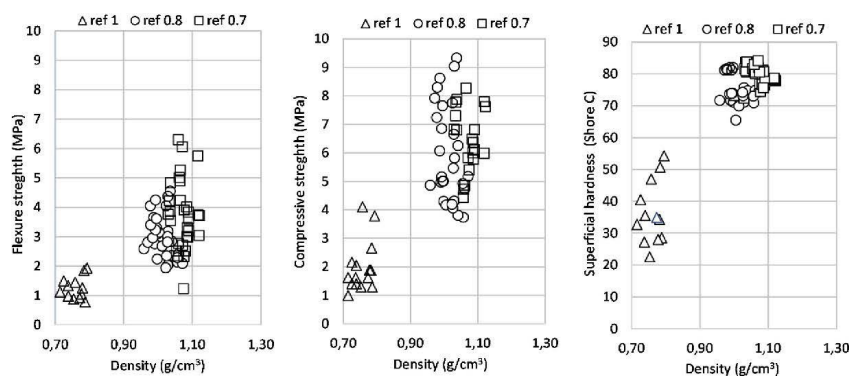


Fig. 4. Density versus flexural/compressive strength and superficial hardness with different water/gypsum ratios.

percentage units is obtained. These values could be considered positive, as the values are consistent with the standards and the recycled materials could be used in the same applications as traditional plaster.

• Surface hardness

Surface hardness decreases as the w/g ratio increases (Table 3). Surface hardness can decrease by up to 37% in w/g = 1 ratios or by 10% in w/g = 0.8 ratios, with respect to compounds with w/g = 0.7 ratios. Regarding the percentage of waste, in most cases, higher surface hardness is achieved when the high percentage of fiber waste, reaching

values up to 82 (shore C).

The flexural and compressive behavior of recycled materials and reference samples (without waste) is determined by studying the trend of the analyzed variables: w/g ratio; percentage of residue; and type of residue.

The results in Fig. 5 show that when the water/gypsum ratio increases, the flexural properties decrease progressively for intermediate w/g ratios of 0.7–0.8, where the highest values drop in higher proportions, causing the material to fail (Fig. 5). It should be noted that all recycled material samples offer higher values than those required by UNE-EN 13279-2 (UNE-EN-13279-2, 2014), except for materials in the w/g = 1 ratio that incorporate rubber & felt waste.

In all the w/g ratios studied, the type of “felt” residue is the one that offers greater flexural strength, being in the ratios 0.7 and 0.8 very close to the reference values (ref). The best results are produced with a ratio of 0.7, a fiber content of 10%, and “felt” residue where the flexural strength increases up to 20% compared to the values of the baseline specimen. This is because although the incorporation of waste implies that the amount of conglomerate (gypsum) decreases, the increase in strength in the mechanical properties is due to the excellent flexural behavior of the felt. The previously mentioned dosages could be used in panel-type precast elements in false ceiling applications or long elements that require high flexural strength.

The results of compressive strength shown in Fig. 6 show a similar behavior to that previously mentioned decreasing gradually the

Table 3
Mean surface hardness (Shore c) with different percentages; water/gypsum ratios and types of waste.

COMPOUND	WASTE			
	Gean	Rubber (R)	Rubber -Felt (RF)	Felt (F)
1-M	50.67	32.57	25.90	36.23
0.8-L	72.33	71.50	74.93	81.47
0.8-M	72.33	68.77	72.67	73.87
0.8-H	72.33	74.00	74.03	81.60
0.7-L	80.57	77.37	78.10	82.60
0.7-M	80.57	76.03	78.47	82.10
0.7-H	80.57	81.07	81.1	81.93

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

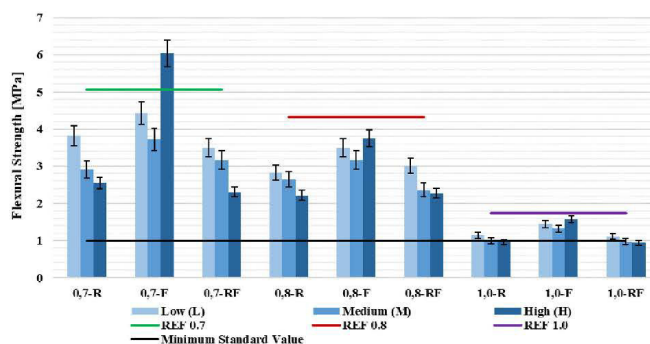


Fig. 5. Flexural strength (axis y, MPa) with different percentages; water/gypsum ratios and types of waste.

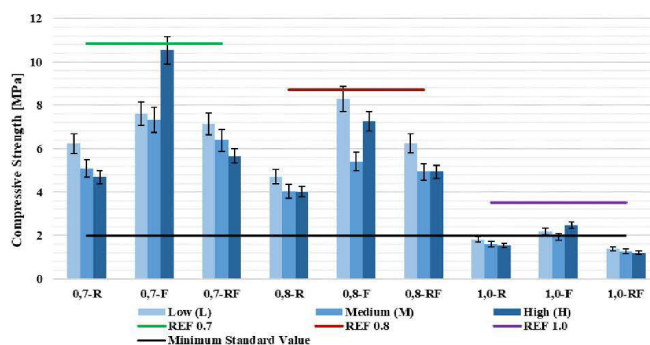


Fig. 6. Compressive strength (axis y, MPa) with different percentages; water/gypsum ratios and types of waste.

compressive strength in intermediate ratios of 0.7–0.8. It should be noted that for a ratio $w/g = 1$ the compressive strength values are lower than those required in the standard UNE-EN 13729-2 (2 MPa), so this dosage can be excluded in later phases of the investigation.

The waste type of “felt” is again the one that offers the highest compressive strength in all these w/g ratios studied with values close to the reference samples when water/gypsum ratios are $w/g = 0.7$ and $w/g = 0.8$. These dosages will be especially recommended for the manufacture of construction elements that work under compressive stresses, such as solid or lightness blocks. On the contrary, the compressive strength could drop to 70% if a $w/g = 0.7$ ratio is used with a low percentage of mixed residue (fibres and rubber) is used. The incorporation of the residue did not increase the compressive strength of the compound, as the addition of residue decreases the amount of conglomerate.

3.2. Statistical results

An analysis of variance has been applied to the mechanical strength values. Table 4 includes the main result of this analysis. The results are shown in terms of the degrees of freedom; and the p -value of the F-test of each of the three components of the model as well as their interactions. This table gives us the first result that all the components are significant in explaining the measured strengths (except for the amount of waste in the flexural strength), as well as the interactions are (except for the interaction of w/g with amount of waste). These results answer the goal

Table 4

Results of analysis of variance (ANOVA) of the flexural and compressive strength.

Factor	Degrees of freedom		P-value of F-test	
	Flexural strength	Compressive strength	Flexural strength	Compressive strength
water/gypsum ratio	3	3	0.0000	0.0000
waste type	3	3	0.0000	0.0000
amount of waste	2	2	0.4893	0.0021
w/g + waste type	6	6	0.0000	0.0000
w/g + amount of waste	2	2	0.0531	0.0000
waste type + amount of waste	4	4	0.0000	0.0000
w/g + type + amount	4	4	0.0000	0.0000
Residuals	48	120	–	–

2 described in section 2.4.

The residual standard error and the coefficient R^2 give additional information about the data and the model.

Regarding flexural strength, the residual standard error of the model

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

is 0.38 MPa, small relative to the global mean of this variable. The adjusted coefficient R^2 is 0.9852, which shows a model with a very high determination. These two numbers show, first, that the experimental data are very precise, as they have a low variability out of that produced by the variables under control; answering goal 1 of those described in section 2.4. Second, the ANOVA model explains almost completely the variability in the measurements of flexural strength; In combination with Table 4, this answer goal 3 of those described in section 2.4.

Regarding the compressive strength, the residual standard error of the model is 0.61 MPa, also a considerably small value. The adjusted coefficient of R^2 is 0.9903, which shows an extraordinary adjustment. Therefore, the results are similar or better to those of the flexural strength.

To study the relative importance of each component of the model (w/g, waste type and amount of waste) for both flexural and compressive strength, the coefficients of the model were analyzed. These coefficients allow to predict, within the limits of the experimental data and within the limits of the residual standard error, the flexural/compressive strength values in terms of the chosen mixture. The results are collected in table 5, which can be found in the appendix, confirming the results shown in Figs. 5 and 6, that the ratio of water to gypsum is the most important effect, particularly with the values 0.7 and 0.8, both in flexural and compressive strength. The main effects of waste type and amount of waste were the second most important, but with a similar contribution to the first and second order interactions among them. This result completes the statistical goals 2 and 3 described in Section 2.4.

The previous models must be checked about its internal coherence, since the ANOVA and the model therein are based on statistical hypotheses on the data such as independency, normality, and homoscedasticity. Both models comply with the hypotheses, so the results could be considered reliable. In the Appendix, a two-fold graph of residues vs. fitted values and quantiles of the residues vs. normal quantiles are shown and commented on for each of the two models (flexural and compressive strengths). In addition to the variables controlled in the laboratory (water/gypsum ratio, type of residue, and amount of residue), the measured variables (flexural/compressive strengths, surface hardness, and density) were compared between them to identify and

quantify their interrelationship.

4. Discussion

Previous analysis has shown that the amount of residue added (low, medium, and high) did not follow a specific pattern that explains how this aspect influences the properties of the material. This could be mainly due to the lack of homogenization of the residue in the gypsum matrix, as observed in some samples. For this reason, future investigations should explore the manufacturing process of the material to achieve greater homogeneity of the residues in the gypsum matrix, or even investigate the effect of using lower w/g ratios to improve the mechanical properties of the material.

As expected, the reference composite presented a continuous and homogeneous crystalline structure with hardly any porosity. Thus, the good mechanical performance is justified. On the one hand, the mixture with rubber waste (0.5-R-14) shows a significant lack of adherence between the gypsum matrix and the residue, as can be appreciated in Fig. 7-b. This fact justifies the significant drop obtain in the strength values.

However, the presence of felt fibers in the mixture is linked to an improvement in the bending strength of the composites. This fact is justified by the good adhesion achieved between this residue and the gypsum matrix, as shown in Fig. 7-c. On the other hand, when both types of aggregate are used together in the mixture (Fig. 7-d), the presence of felt fibers counteracts the lack of adherence provided by the rubber, thus justifying the results of previous sections.

The results of flexure, compressive, and density have been compared with values obtained in other similar research works (water/plaster ratio = 0.7 and waste percentages = 10–15%) that have incorporated rubber or fiber waste in a gypsum matrix (Fig. 8).

In general, the mechanical behavior when using fiber waste is higher than when using rubber. The highest flexure values are obtained with natural fibers such as wood and wool, even above the reference value (5.1 MPa). With gypsum/rubber compounds, mechanical properties decrease by almost 50% in all cases. Except for the gypsum-polyamide matrix (Gutiérrez-González et al., 2013), the values of the mechanical

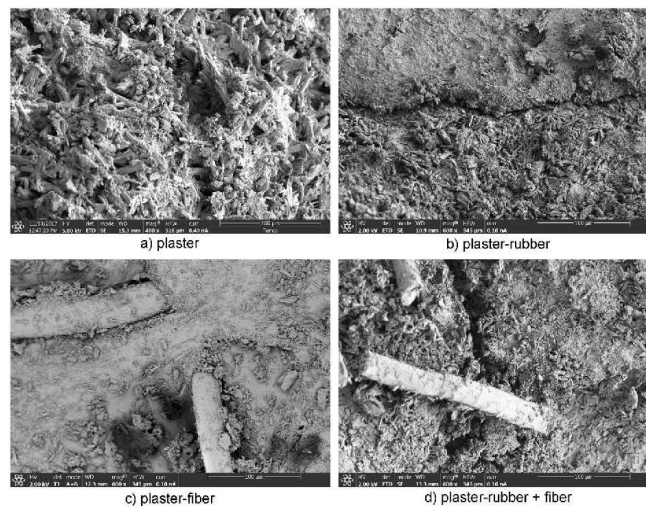


Fig. 7. Microscopy 600x, plaster (a), plaster-rubber (b), plaster-fiber (c) and plaster-rubber + fiber (d).

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

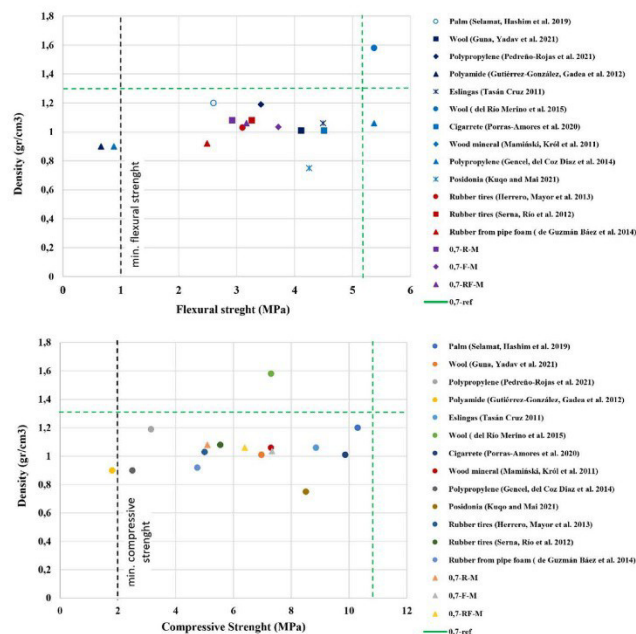


Fig. 8. Research studies using fiber or rubber waste in gypsum compounds. Mechanical properties versus density.

properties are above the minimum value required by the UNE-EN 13279-2 standard. This comparative study confirms that the mechanical properties of the proposed compounds are in line with the literature and are suitable for the development of the applications previously indicated in this section.

5. Conclusions

The research carried out evaluates the physical-mechanical behavior of new recycled materials that incorporate waste from padel-tennis balls to replace plaster for use in construction. It is proposed a new solution within the field of construction materials with results that could be useful for manufacturers in the development of new products, as for example, panels (flexure) or blocks (compressive), as well as in the search of optimal mixtures complying with the regulatory requirements. Likewise, the solution contributes to reduce the amount of raw material needed to manufacture the compound due to the partial replacement of water and plaster by waste. Among the general advantages of these innovative materials, the reduction of energy and the amount of carbon dioxide emissions that can be attributed to the manufacture of the binder, as well as the use of waste that prolongs its useful life, could be highlighted. After the experimental campaign and the statistical analysis, the following conclusions can be drawn.

The mixture with the best physical-mechanical results among those studied is obtained with a ratio $w/g = 0.7$, with 10% felt residue admix, and crushed size 5 mm, although all dosages of $w/g = 0.7$ and $w/g = 0.8$ meet the minimum values required by the standard. The property that best distinguishes the behavior of the test pieces is density, which can be directly related to the water/gypsum ratio. The samples of low density ($<0.85 \text{ g/cm}^3$) and high density ($>0.95 \text{ g/cm}^3$) have a significantly

different response in properties such as flexural, compressive, and surface hardness. Statistical analysis corroborates that density is a determining factor in the mechanical properties of plasters for the three types of residues studied and is a key parameter in the design of those construction elements that require lightness properties.

Generally, the incorporation of residue did not increase the flexural-compressive strength of the compound, as the addition of residue decreases the amount of conglomerate, however, compounds with a w/g ratio of 0.7 and a felt fiber waste content of 10%, the flexural strength could increase up to 20% compared to the values of the baseline sample. The SEM images show the good adhesion achieved between the fiber residue and the gypsum matrix while the rubber residue shows a significant lack of adherence leading to a significant drop observed in the strength values. Also, it was confirmed that the mechanical results of the proposed compounds are in line with those in the literature. Mechanical properties (flexure and compressive) increase more intensely when the surface hardness exceeds the value of 60 units. Surface hardness can decrease by up to 37% in $w/g = 1$ ratios or by 10% in $w/g = 0.8$ ratios, with respect to compounds with $w/g = 0.7$ ratios. The water absorption and surface hardness also meet the standards, so the recycled materials could be used in the same applications as traditional plaster.

The statistical study verifies the representativeness and robustness of the experimental data and compare the significance of the three variables under control in the experiment about the mechanical properties of the test specimens. The main effects of the water/gypsum ratio and the type of residue are very significant, while the amount of residue does not have a significant main effect. The second and third-order interactions are also significant, except for water/gypsum with the amount of residue. These results may be interesting in future research aimed at characterizing a specific product made from this recycled

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

material.

This innovative material includes the benefits of secondary raw materials and the problem of padel-tennis waste disposal. At this moment, rubber and felt wastes from either the manufacture of or derived from used padel/padel tennis balls would be suitable for the manufacture of precast panels, such as suspended ceiling plates or interior cladding walls. The different types of panels currently commercialized can be manufactured with padel-tennis waste, saving money and removing waste from our society leading to a sustainable built environment. Any other construction element that is currently made from gypsum can be manufactured with this recycled material, as well as its use as regular plaster. Future investigations should explore the porosity and workability using lower w/g ratios to improve the mechanical properties of the material, as that is a key property when industrializing precast products.

CRediT authorship contribution statement

Marta Rodríguez Aybar: Conceptualization, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **César Porras-Amores:** Conceptualization, Methodology, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization, Supervision. **Esther Moreno**

Fernández: Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing, Supervision. **Alvaro Pérez Raposo:** Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing, Visualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

The authors thank the staff of the Construction & Building Materials Laboratory of the Escuela Técnica Superior de Edificación of the Universidad Politécnica de Madrid for their support in time and energy helping us conduct these tests, as well as to Placo Saint-Gobain for supplying us with the gypsum used.

APPENDIX

In this appendix some results of the ANOVA models discussed in section 3.2 are gathered.

Table 5 shows the adjusted parameters of each model (flexural/compressive strength), where the importance of the main effects, as well as the first- and second-order interactions, could be appreciated.

Table 5
Adjusted flexural and compressive strength model parameters.

Effects	Estimated value (MPa)		p-value of t-test	
	Flexural strength	Compressive strength	Flexural strength	Compressive strength
w/g 0.7	5.1 ± 0.2	10.9 ± 0.2	0.0000	0.0000
w/g 0.8	4.3 ± 0.2	8.7 ± 0.2	0.0000	0.0000
w/g 1.0	1.7 ± 0.2	3.5 ± 0.2	0.0000	0.0000
Felt	1.0 ± 0.3	-0.3 ± 0.3	0.0031	0.3319
Rubber	-2.5 ± 0.3	-6.2 ± 0.3	0.0000	0.0000
Rubber & Felt	-2.8 ± 0.3	-5.2 ± 0.3	0.0000	0.0000
Quantity of residue low	-0.5 ± 0.3	-1.9 ± 0.3	0.1199	0.0000
Quantity of residue medium	0.9 ± 0.3	0.7 ± 0.3	0.0083	0.0407
w/g 0.8 + felt	-1.5 ± 0.4	-1.1 ± 0.5	0.0011	0.0254
w/g 1.0 + felt	0.9 ± 0.4	2.0 ± 0.5	0.0457	0.0001
w/g 0.8 + rubber	0.4 ± 0.4	1.5 ± 0.5	0.3638	0.0028
w/g 1.0 + rubber	1.4 ± 0.4	3.9 ± 0.5	0.0031	0.0000
w/g 0.8 + rubber & felt	0.7 ± 0.4	1.4 ± 0.5	0.1194	0.0044
w/g 1.0 + rubber & felt	1.1 ± 0.4	2.2 ± 0.5	0.0152	0.0000
w/g 0.8 + quantity of residue low	1.2 ± 0.4	3.2 ± 0.5	0.0077	0.0000
Felt + quantity of residue low	-1.1 ± 0.4	-1.0 ± 0.5	0.0158	0.0476
Rubber + quantity of residue low	1.8 ± 0.4	3.5 ± 0.5	0.0002	0.0000
Felt + quantity of residue medium	-3.1 ± 0.4	-3.9 ± 0.5	0.0000	0.0000
w/g 0.8 + rubber + quantity of residue low	-1.9 ± 0.6	-4.1 ± 0.7	0.0038	0.0000
w/g 0.8 + felt + quantity of residue medium	2.5 ± 0.6	2.1 ± 0.7	0.0002	0.0033

The diagnostic graphs of the hypotheses of the ANOVA model of flexural strength are shown in Fig. 9.

In the first graph (left), no structure is observed in the residues, nor is an approximately regular dispersion along the adjusted values, so that they can be considered homoscedastic (having the same variance). The second graph (right) shows that the residue quantiles do not differ significantly from the normal ones and therefore the hypothesis of normality of the residues can be considered satisfied. A Shapiro normality test on the residues gives a p-value of 0.0735, which corroborates the above conclusion.

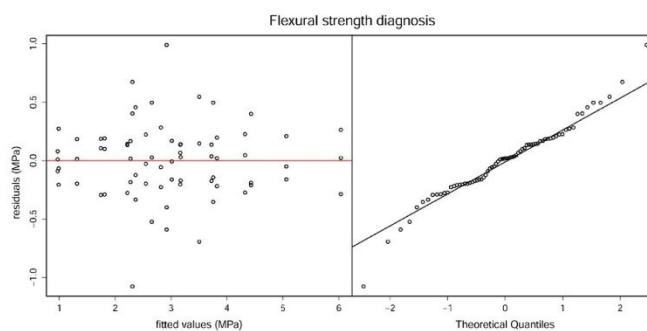


Fig. 9. Diagnostic graphs for the three-way ANOVA model for bending strength as a function of water/gypsum, type of residue, and amount of residue. Waste against adjusted values (left). QQ plot of the residues (right).

The compressive strength diagnostic graphs are similar to the previous ones and are shown in Fig. 10. The first graph shows that the residues can be considered homoscedastic. The second graph places the waste distribution close to normal. Shapiro's normality test applied to the residues gives a p-value of 0.1194, which corroborates the above conclusion.

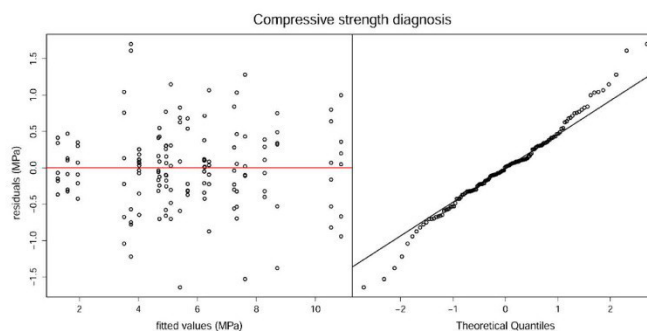


Fig. 10. Diagnostic graphs of the three-way ANOVA model for compressive strength as a function of water/gypsum, type of residue, and amount of residue. Waste against adjusted values (left). QQ plot of the residues (right).

In addition to the variables controlled in the laboratory (water/gypsum ratio, type of residue, and amount of residue), the measured variables (flexural/compressive strengths, surface hardness, and density) were compared between them to identify and quantify their interrelationship. Fig. 11 shows the six possible couplings among the four variables.

M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

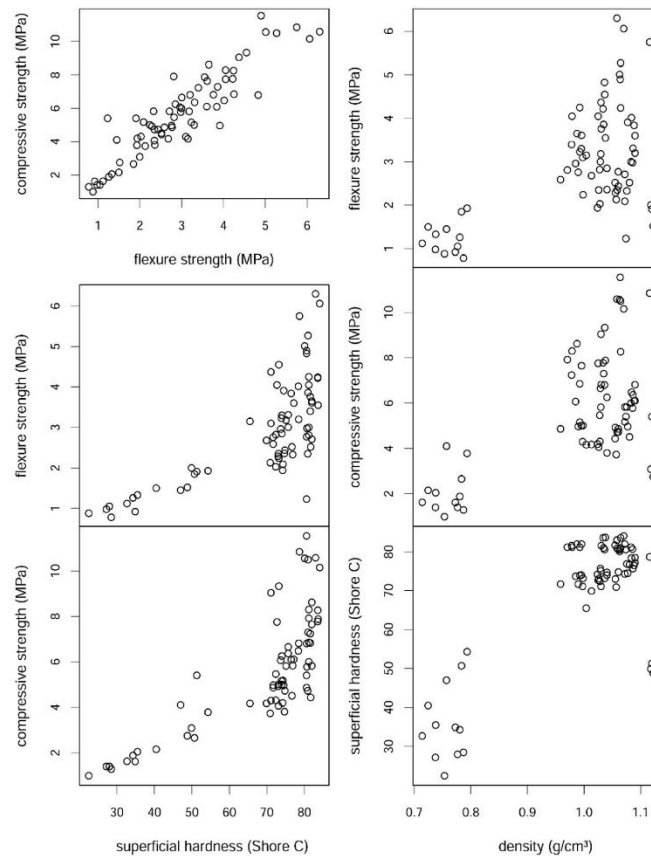


Fig. 11. Left: compressive strength as a function of flexure strength (top) and both mechanical properties as a function of surface hardness. Right: flexural strength, compressive strength, and surface hardness, depending on the density of each specimen.

The flexural/compressive strength graph points to a linear relationship between both variables, supported by the high value of the linear correlation coefficient (0.91). The values confirm that the relationship between compressive and flexural strength is similar when the samples incorporate waste and when not.

The two graphs of flexural/compressive strengths against surface hardness have a similar appearance as stated above. The highlight of both graphs is the grouping of the points in two clearly separated zones, one for the test pieces with a hardness less than 60 units and another with a hardness greater than 60. This aspect showed that the mechanical properties (flexure and compressive) increase more intensely when the surface hardness exceeds the mentioned value.

The graphs of the three variables (flexural/compressive strength and superficial hardness) versus density provide the best explanation of the differentiated effect that waste produces on the properties of the compounds studied. The cloud of points is divided into two clearly separated groups because of density. Values with a density less than 0.85 g/cm^3 were named 'low density' and values greater than 0.95 g/cm^3 were named 'high density'. Apparently, their responses to flexure, compressive, and hardness were significantly different with this classification.

An analysis of the variance of each of these variables in terms of high or low density completely justifies the use of density as a differentiating factor. Table 6 shows the estimate of the flexural, compressive, and superficial hardness as a function of the grouping by high or low density and the residual error of these estimates.

Table 6
ANOVA table between densities and mechanical properties

Response variable	Low density	High density	Residual error	p-value
Flexural strength (MPa)	1.3 ± 0.3	3.3 ± 0.1	1.0	0.0000
Compressive strength (MPa)	2.4 ± 0.5	6.7 ± 0.3	2.0	0.0000
Superficial hardness (Shore C)	39 ± 2	76 ± 1	8	0.0000

The p-value in all three cases indicates that the result is highly significant ($p < 0.05$). Therefore, the density is the factor that, by itself, has more influence on the rest of the mechanical properties. This analysis indicates that density is a determining factor in the mechanical properties of plasters with these residues and must be considered when designing construction elements that require properties of lightness. The density is an indication of the water/gypsum ratio. The results of the statistical analysis in Tables 4 and 5 indicate that the water/gypsum ratio is the most important factor, which is completely in agreement with this last observation.

References

Alameda, L., Calderón, V., Junco, C., Rodríguez, A., Gadea, J., Gutiérrez-González, S., 2016. Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Mater. Construcción* 66 (324), e100. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.06015>.

Arvelo Remoso, E., 2011. B uso de plumas de pollo para aumentar la tenacidad del yeso. Tesis Master, Universidad Politécnica de Madrid. España). E.T.S. de Edificación (UPM). <https://oa.upm.es/9314/>.

Boccardo, L., Durante, M., Iuculano, F., Moerino, D., Langella, A., 2020. Production of hemp-gypsum composites with enhanced flexural and impact resistance. *Construct. Build. Mater.* 260, 120476. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120476>.

Cherki, A.-b., Remy, B., Khabbazi, A., Jannot, Y., Baillis, D., 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Construct. Build. Mater.* 54, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.076>.

Cozzarini, L., Marsich, L., Feluga, A., Schmid, C., 2020. Life cycle analysis of a novel thermal insulator obtained from recycled glass waste. *Develop. Built Environ.* 3, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100014>.

De Lacia, M., Treves, A., Comino, E., 2021. Rice husk and thermal comfort: design and evaluation of indoor modular green walls. *Develop. Built Environ.* 6, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100043>.

de Ministros, Consejo, 2020. Estrategia Española de Economía Circular “España 2030” (EEEC). Aprobado el 2 de junio de 2020.

Del Río Merino, M., 2005. Nuevas aplicaciones del concho en el campo de la edificación. III Encuentro Eurocork. <https://oa.upm.es/1896/>.

Del Río Merino, M., Gómez Moreira, C., Villoria Sáez, P., 2023. Mechanical behavior of a gypsum material with additions of recycled waste from absorbent hygienic products. *Construct. Build. Mater.* 367, 130247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130247>.

Del Río-Merino, M., Vidal es-Barrigete, A., Piña-Ramírez, C., Vitidlo, V., Santa Cruz-Astorqui, J., Castelluccio, R., 2022. A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates. *J. Build. Eng.* 45, 103338. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103338>.

Deng, Y.-H., Furuno, T., 2001. Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers. *J. Wood Sci.* 47 (6), 445–450. <https://doi.org/10.1007/BF00767896>.

Ecocarb company. 3D printing. <https://www.ecocarb.com/> (accessed March 2022).

Erbs, A., Nagalli, A., Carvalho, K.Q.d., Mazer, W., Moraes Erbs, M.d., Paz, D.H.F., Lafayette, K.P.V., 2021. Development of plasterboard sheets exclusively from waste. *J. Build. Eng.* 44, 102524. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102524>.

Gençel, O., del Coz Díaz, J.J., Satcu, M., Koksal, F., Alvarez Rabanal, F.P., Martínez-Barreira, G., Brostow, W., 2014. Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: numerical and experimental results. *Energy Build.* 70, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.047>.

Gong, X., Akashi, Y., Sumiyoshi, D., 2012. Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas. *Build. Environ.* 58 (0), 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.014>.

Green ball company. Energy valuation of the paddle/tennis balls. <https://www.greenball.es/> (accessed March 2022).

Guna, V., Yadav, C., Maitrhi, B.R., Ilangovan, M., Touchal eume, F., Saulnier, B., Grohens, Y., Reddy, N., 2021. Wood and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance. *J. Build. Eng.* 41, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102433>.

Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, M.T., Calderón, V., 2012. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construct. Build. Mater.* 34, 179–185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.061>.

Gutiérrez-González, S., Alonso, M.M., Gadea, J., Rodríguez, A., Calderón, V., 2013. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construct. Build. Mater.* 38, 407–412. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.034>.

Hernández-Olivares, F., Bollati, M.R., del Río, M., Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construct. Build. Mater.* 13 (4), 179–186. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00021-5).

Herrero, S., Mayor, P., Hernández-Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Mater. Des.* 47, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.063>.

Ismail, B., Belayachi, N., Hoxha, D., 2020. Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster composites using natural additives. *Construct. Build. Mater.* 254, 118959. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118959>.

Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A., García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construct. Build. Mater.* 55, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>.

Kuqo, A., Mai, C., 2021. Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers. *Construct. Build. Mater.* 282, 122714. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122714>.

Li, X., Cai, H., Li, R., Zhao, Y., Ma, X., Shao, X., 2012. A theoretical model to calculate the distribution of air age in general ventilation system. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 33 (2), 159–180. <https://doi.org/10.1177/0143624111404636>.

Manniskí, M.L., Król, M.E., Jaskółowski, W., Borysiuk, P., 2011. Wood-mineral wool hybrid particleboards. *Enr. J. Wood and Wood Prod.* 69 (2), 337–339. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0470-6>.

Marrero, M., Martínez-Escobar, L., Moyano, P., Leiva, C., 2013. Minimización del impacto ambiental en la ejecución de fachadas mediante el empleo de materiales reciclados. *Inf. Construcción* 65, 89–97. <https://doi.org/10.3989/ic.11.034>.

Mayo-Corrochano, C., Sánchez-Aparicio, L.J., Aira, J.-R., Sanz-Arauz, D., Moreno, E., Pinilla Melo, J., 2022. Assessment of the elastic properties of high-fired gypsum using the digital image correlation method. *Construct. Build. Mater.* 317, 125945. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125945>.

Morales-Condé, M.J., Rodríguez-Lláñán, C., Pedreño-Rojas, M.A., 2016. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. *Construct. Build. Mater.* 114, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.137>.

Morales-Segura, M., Porras-Amores, C., Villoria-Sáez, P., Caballó-Bartolomé, D., 2020. Characterization of gypsum composites containing cigarette. *Butt Waste Build. Appl.* 12 (17), 7022. <https://doi.org/10.3390/bu12177022>.

Oficial del Estado, Boletín, 2022. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y su des contaminados para una economía circular. BOE nº 85 de 09/04/2022.

Ramos, F.J.H.T.V., Mendes, L.C., 2014. Recycled high-density polyethylene/gypsum composites: evaluation of the microscopic, thermal, flammability, and mechanical properties. *Green Chem. Lett. Rev.* 7, 199–208. <https://doi.org/10.1080/17518253.2014.924591>.

Recycle balls company. Reusing and recycling all tennis balls. <https://www.recycleballs.org/> (accessed March 2022).

Rivero, A.J., Báez, A.d.G., Navarro, J.G., Cortina, M.G., 2011. Nuevos Materiales de Base Yeso con Incorporación de Residuos de Caucho: Caracterización Físico-Mecánica. IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción. https://oa.upm.es/12206/1/INVE_MEM_2011_89533.pdf.

Romaniega Piñero, S., del Río Merino, M., Pérez García, C., 2015. New plaster composite with mineral wool fibres from CDW recycling. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015, 854192. <https://doi.org/10.1155/2015/854192>.

Romero-Gómez, M.I., Pedreño-Rojas, M.A., Pérez-Gálvez, F., Rubio-de-Hita, P., 2021. Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes. *J. Build. Eng.* 34, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101874>.

Romero-Gómez, M.I., Silva, R.V., Flores-Cole, I., de Brito, J., 2022. Influence of polypropylene residues on the physico-mechanical and water resistance properties of gypsum plasters. *J. Clean. Prod.* 371, 133674. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133674>.

Sáez, P., del Río Merino, M., Sánchez, E., Astorqui, J., Porras-Amores, C., 2019. Viability of gypsum composites with addition of glass waste for applications in construction. *J. Mater. Civ. Eng.* 31. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)JMC.1943-5533.0002604](https://doi.org/10.1061/(ASCE)JMC.1943-5533.0002604).

Santa Cruz Astorqui, J., del Río Merino, M., Villoria Sáez, P., Porras-Amores, C., 2017. Analysis of the relationship between density and mechanical strength of lightened gypsums: proposal for a coefficient of lightning. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 7092521. <https://doi.org/10.1155/2017/7092521>.

Santos Jiménez, R., 2018. Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles. Tesis Doctoral,



M. Rodríguez Aybar et al.

Journal of Cleaner Production 413 (2023) 137392

- Universidad Politécnica de Madrid. España). E.T.S. de Edificación (UPM). <https://oa.upm.es/53564/>.
- Selamat, M.E., Hashim, R., Sulaiman, O., Kassim, M.H.M., Saharudin, H.I., Taiwo, O.F.A., 2019. Comparative study of oil palm trunk and rice husk as fillers in gypsum composite for building material. *Construct. Build. Mater.* 197, 526–532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.093>.
- Serna, Á., Río, M.d., Palomo, J.G., González, M., 2012. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construct. Build. Mater.* 35, 633–641. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.093>.
- Sophia, M., Sakthiesvaran, N., 2019. Synergistic effect of mineral admixture and bio-carbonate fillers on the physico-mechanical properties of gypsum plaster. *Construct. Build. Mater.* 204, 419–439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.160>.
- Suresh, S.S., Mohanty, S., Nayak, S.K., 2017. Composition analysis and characterization of waste polyvinyl chloride (PVC) recovered from data cables. *Waste Manag.* 60, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.033>.
- Taher, A.-I., Elie, F., Ashraf, F., 2014. Thermal conductivity of rubberized gypsum board. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 7 (1) <https://doi.org/10.3844/ajeaspp.2014.12.22>.
- Tasán Cruz, D.M., 2011. Caracterización de morteros de yeso reforzados con fibras recuperadas de eslingas textiles de un solo uso. Tesis Master, Universidad Politécnica de Madrid (España). E.T.S. de Edificación (UPM). <https://oa.upm.es/10636/>.
- UNE-102042, 2014. Gypsum Plasters. Other Test Methods.
- UNE-EN-13279-1, 2009. Gypsum Binders and Gypsum Plasters - Part 1: Definitions and Requirements.
- UNE-EN-13279-2, 2014. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. In: Parte 2: Métodos de ensayo. Winball. <http://www.winball.es/>. March 2022).
- UNE-EN-1936, 2007. Natural Stone Test Methods - Determination of Real Density and Apparent Density, and of Total and Open Porosity.
- Une-En-520:2005+A1, 2010. Gypsum Plasterboards - Definitions, Requirements and Test Methods, vol. 26.

B) Propiedad Industrial

2022. Modelo de utilidad ES-1300512U.

<p>19  OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS ESPAÑA</p>	
<p>11) Número de publicación: 1 300 512</p>	
<p>21) Número de solicitud: 202330625</p>	
<p>51) Int. Cl.:</p>	
<p>C04B 18/04 (2006.01)</p>	
<p>C04B 18/22 (2006.01)</p>	
<p>C04B 28/02 (2006.01)</p>	
<p>C04B 28/14 (2006.01)</p>	
<p>12) SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD U</p>	
<p>22) Fecha de presentación: 20.06.2022</p>	<p>71) Solicitantes: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (100.0%) Avda. Ramiro de Maeztu 7 28040 Madrid (Madrid) ES</p>
<p>43) Fecha de publicación de la solicitud: 13.06.2023</p>	<p>72) Inventor/es: RODRÍGUEZ AYBAR, Marta; MORENO FERNÁNDEZ, María Esther y PORRAS AMORES, César</p>
<p>74) Agente/Representante: ELZABURU, S.L.P</p>	
<p>59) Título: Material de construcción y panel de dicho material de construcción</p>	

ES 1 300 512 U

ES 1 300 512 U

DESCRIPCIÓN

Material de construcción y panel de dicho material de construcción

SECTOR DE LA TÉCNICA

5 La presente invención pertenece al campo técnico de los materiales de construcción. Más en particular pertenece al campo técnico de los materiales de construcción que comprenden un material conglomerante.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

10 El yeso es un material tradicional que ha sido empleado en la construcción desde la antigüedad. El yeso también se ha utilizado en la decoración, en la medicina e incluso en la alimentación. Para la obtención del yeso de construcción, producto pulverulento utilizado en la fabricación de paneles, prefabricados o directamente en obra, se puede partir de la roca sedimentaria denominada aljez, cuya composición es sulfato de calcio bihidratado, muy abundante en la naturaleza.

15 La escayola se diferencia del yeso en que su granulometría es más fina y su pureza está por encima del 80%. Entre sus ventajas pueden destacar una gran resistencia al fuego, buen aislamiento térmico y acústico. Es un material durable, no tóxico, con comportamiento higroscópico de fácil aplicación e idóneo para revestimiento de paramentos y techos con alto grado de confortabilidad.

20 En España se consumen anualmente alrededor de 25 millones de pelotas de pádel y tenis, generando aproximadamente 2000 toneladas de residuos al año. Siendo muy difícil su reciclado debido a la naturaleza de sus componentes (núcleo de caucho reticulado 100% combinado con algunos compuestos químicos y cubiertas de un fieltro amarillo) de baja degradabilidad, por lo que llevaría muchos años su descomposición en vertederos.

25 Son muchas las investigaciones y patentes encontradas sobre aplicaciones y compuestos de yesos. Entre las que cabe destacar actualmente:

30 La patente ES 1241509 U "Prefabricado de yeso aligerado con residuos de espuma de poliuretano" trata de obtener un prefabricado aligerado con espuma de poliuretano (procedente de residuo industrial) y fibras que mejoran las propiedades mecánicas. Obteniendo placas de escayola para techos suspendidos consiguiendo una mejora estética y acústica.

La patente ES 1227514 U titulada "Placa de yeso prefabricada de alta resistencia al fuego" se basa en la fabricación de placas prefabricadas, con un núcleo compuesto de áridos

ES 1 300 512 U

procedentes de la siderurgia, recubierto por ambas caras de un revestimiento celulósico. Obteniendo un material para prefabricados con mayor resistencia al fuego que los prefabricados tradicionales.

5 La patente ES 2176105 con título "Producto polivalente, aislante, anti vibratorio, adhesivo y resistente al fuego para diferentes sectores industriales, especialmente para la construcción", investiga un material para revestimientos y particiones interiores compuesto por yeso y acetato de polivinilo, obteniendo un producto de construcción aplicable como aislante y amortiguador de vibraciones.

10 La patente P201930955 "Yeso con polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (nfu) y reforzado con fibras de carbono, su procedimiento de obtención y su uso" describe la obtención del yeso aligerado con polvo de caucho (neumáticos fuera de uso) y fibras de carbono. Utilizándolo para la elaboración de prefabricados aligerados en placas y paneles de escayola.

15 La patente P202030595 "material de escayola de rápido fraguado y aligerado con polímeros en granza" obtiene como resultado un nuevo material de escayola aligerada para la elaboración de falsos techos, con una disminución entre el 15 y 20% de su peso, un fraguado mucho más rápido y un mejor aislamiento térmico, que los prefabricados para techos tradicionales.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INVENCION

20 La presente invención trata de resolver problemas que presentan soluciones del estado de la técnica como los mencionados arriba.

25 Las placas y paneles prefabricados de escayola se utilizan en la construcción desde hace varias décadas, teniendo un gran campo de aplicación en la edificación para la ejecución de revestimientos, falsos techos y tabiquerías interiores entre otros. Estas placas o paneles deben tener una cierta estabilidad mecánica que les permita soportar esfuerzos de flexión y pandeo, así como poseer ciertas propiedades de aislamiento térmico y acústico que consiga mejorar el confort en el interior de las estancias donde son ejecutadas. Hoy en día, se sigue investigando en esta línea con la intención de mejorar estas propiedades físicas y mecánicas mediante el diseño de nuevos materiales de escayola más competitivos en el mercado.

30 A efectos de este documento, se entiende por placa o panel prefabricado cualquier elemento constructivo, o parte de este, fabricado previamente en un lugar diferente a su emplazamiento final. De manera preferente, dicho elemento constructivo puede consistir en módulos

ES 1 300 512 U

prefabricados, paneles para divisiones interiores, cielorrasos y falsos techos, todos ellos de cualquier superficie y espesor.

La presente invención permite reutilizar los residuos de pelotas de pádel en una matriz de material conglomerante, permitiendo reducir el consumo de materia prima, es decir, de material extraído de la naturaleza, al sustituir parte del material conglomerante por dicho
5 residuo. De esta manera la presente invención contribuye a la conservación del medio ambiente, reduciendo la cantidad de CO₂ producida al fabricar el material de construcción y permitiendo eliminar residuos de descomposición muy lenta, como son las pelotas de pádel, incluyéndolas en un material de construcción tras haberlas triturado.

10 Un primer aspecto de la presente invención se refiere a un material de construcción aislante que comprende:

- una mezcla de agua y material conglomerante, siendo la relación en peso agua/material conglomerante de al menos 0,6 y como máximo de 1,0; y
- partículas de caucho, siendo la relación en peso entre las partículas de
15 caucho y el material conglomerante de al menos un 10% y como máximo de un 20%; estando la relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante definida como:

$$r = \frac{m_p}{m_c}$$

donde:

20 r : es la relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante,

m_p : es la masa total de las partículas de caucho del material de construcción y

m_c : es la masa total del material conglomerante del material de construcción.

La relación en peso agua/material conglomerante se puede definir como:

$$s = \frac{m_a}{m_c}$$

25 donde:

s : es la relación en peso agua/material conglomerante,

m_a : es la masa total de agua del material de construcción y

m_c : es la masa total del material conglomerante del material de construcción,

ES 1 300 512 U

estando cada partícula de caucho adherida a un fieltro.

En la presente divulgación, se entiende por material conglomerante aquel que es capaz de unir partículas de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto. En algunas realizaciones, el material conglomerante es anhidrita, yeso y/o escayola.

- 5 Como material conglomerante puede emplearse cualquier tipo de escayola o yeso comercial, siendo preferible el empleo de escayolas tipo E-35 ó E-35-L (designado como Conglomerante a base de yeso tipo A según la norma 13279-1) debido a sus buenas prestaciones técnicas. La escayola E-35 es un material comúnmente empleado en la edificación, constituido principalmente por sulfato de calcio semihidratado ($\text{SO}_4\text{Ca}1/2\text{H}_2\text{O}$), y que puede incorporar
- 10 aditivos reguladores de fraguado en su composición. Se trata de un material pulverulento de elevada pureza y finura de molido, con una resistencia mínima de 3,5 N/mm² a flexotracción y una conductividad térmica aproximada de 0,34 W/mK. El fraguado de la escayola E-35-L es relativamente lento.

En algunas realizaciones, el material de construcción es un yeso aligerado.

- 15 Según la norma UNE-EN 13279-1:2009, se entiende por yesos aligerados aquellos compuestos formados por una mezcla de sulfato de calcio en sus distintas fases de deshidratación (anhidrita, hemihidrato o dihidrato), con un contenido determinado en hidróxido de calcio, que lleva incorporados agregados ligeros inorgánicos u orgánicos, a los que debe añadirse agua de amasado para su puesta en obra. Por lo tanto, el material de construcción
- 20 objeto de la presente invención, al que se incorpora las partículas de caucho podría incluirse dentro de la definición recogida en la mencionada norma.

- Para la elaboración de este material de construcción se emplean partículas de caucho, por ejemplo, procedentes de pelotas de pádel y/o de tenis. La intención principal al elegir estas pelotas para triturarlas a un tamaño preferiblemente comprendido entre 4 mm y 5 mm, es
- 25 dotar a este caucho de una segunda vida útil y evitar el impacto medioambiental que genera su lenta degradación natural.

- De esta forma, se consigue obtener un material de construcción con excelentes prestaciones para la elaboración de placas y paneles prefabricados, manteniendo unas buenas prestaciones técnicas e incorporando criterios de sostenibilidad y economía circular en la
- 30 ejecución de los nuevos materiales de construcción más respetuosos con el medioambiente.

Los desarrollos del estado de la técnica han buscado un material que, mezclado con diferentes residuos, mejora las propiedades de los productos del yeso, contribuye en el reciclaje del residuo y ayuda a minimizar la utilización de recursos naturales. Pero no se ha encontrado

ES 1 300 512 U

ningún desarrollo del estado de la técnica que incluya mezclas de yeso con caucho natural procedente de pelotas de pádel o tenis. Por lo tanto, es interesante, dado el alto consumo de utilización de pelotas de tenis y pádel y el periodo tan breve de utilización, alrededor de tres partidos en aficionados y dos partidos en profesionales, la finalidad de la presente invención.

- 5 La suma de los porcentajes en peso del agua, del material conglomerante y de las partículas de caucho del material de construcción es menor o igual al 100% en peso del material de construcción, siendo los porcentajes en peso con respecto al peso del material de construcción.

- 10 En algunas realizaciones, la relación en peso agua/material conglomerante es de al menos 0,6 y como máximo de 0,8. Estas realizaciones permiten mejorar la resistencia mecánica del material de construcción en comparación con realizaciones con una relación en peso agua/material conglomerante mayor.

- 15 En algunas realizaciones, cada partícula de caucho tiene un tamaño tal que la partícula puede alojarse en un cubo de 5 mm de lado y no puede alojarse en un cubo de lado menor a 4 mm. El uso de partículas de este tamaño resulta ventajoso porque se pueden obtener fácilmente, por ejemplo, mediante triturado de pelotas de tenis y/o pelotas de pádel.

- 20 El fieltro puede comprender fibras como, por ejemplo, fibras de poliamida, de algodón y/o de lana. Si bien el fieltro puede reducir la resistencia mecánica del material de construcción en comparación con el material de construcción con partículas de caucho sin fieltro, las partículas de caucho con fieltro se pueden obtener fácilmente, por ejemplo, mediante el triturado de pelotas de tenis y/o de pelotas de pádel y permiten obtener un material de construcción con propiedades adecuadas.

- 25 En algunas realizaciones, las partículas son fragmentos de pelotas de tenis y/o de pelotas de pádel como, por ejemplo, pelotas de tenis y/o pelotas de pádel fuera de uso. La intención principal al elegir este tipo de materia prima para triturarla es dotar a las pelotas de una segunda vida útil y evitar el impacto medioambiental que genera su lenta degradación natural. Las pelotas de tenis y/o pelotas de pádel en general comprenden una esfera de caucho y un fieltro de recubrimiento de la esfera, estando el fieltro adherido a la esfera. El caucho puede ser natural y/o sintético.

- 30 En algunas realizaciones, las partículas de caucho tienen una densidad menor que la mezcla de agua y material conglomerante del material de construcción. De este modo, este material de construcción sólido es más ligero en comparación con un material de construcción sólido

ES 1 300 512 U

que comprendiese la mezcla de agua y material conglomerante en lugar de las partículas de caucho.

Un segundo aspecto de la presente invención se refiere a un panel, comprendiendo el panel el material de construcción del primer aspecto de la presente invención. En algunas
5 realizaciones, el panel es un panel prefabricado.

Un tercer aspecto de la presente invención se refiere a un proceso de elaboración del material de construcción del primer aspecto de la presente invención, comprendiendo el proceso

- triturar un producto de caucho obteniendo partículas del producto de caucho;
- mezclar las partículas con material conglomerante y con agua, obteniendo
10 una mezcla con una relación en peso agua/material conglomerante de al menos 0,6 y como máximo de 1,0; y teniendo la mezcla una relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante de al menos un 10% y como máximo de un 20%, de modo que se obtiene el material de construcción; estando la relación en peso entre las partículas de caucho y el
15 material conglomerante definida como:

$$r = \frac{m_p}{m_c}$$

donde:

r : es la relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante,

m_p : es la masa total de las partículas de caucho del material de construcción y

20 m_c : es la masa total del material conglomerante del material de construcción.

Por lo tanto, el objeto de la presente invención, a diferencia de los materiales y sus métodos de obtención descritos en el estado de la técnica, es presentar un nuevo material de construcción que permite la elaboración de prefabricados con baja densidad, con baja conductividad térmica y buenas propiedades mecánicas. Dicho material se consigue mediante
25 la adición de partículas de caucho, por ejemplo, de pelotas de pádel y/o de tenis fuera de uso. Estas partículas de caucho se incorporan en el proceso de fabricación de los materiales de yeso o escayola cuando estos se encuentran aún en estado líquido al haberse combinado el polvo de yeso o escayola con agua y la pasta resultante se ha homogeneizado, de tal manera que posteriormente se produzca un fraguado continuo y endurecimiento conjunto de la mezcla
30 final resultante.

ES 1 300 512 U

De esta forma, se consigue obtener un material de construcción con excelentes prestaciones para la elaboración de placas y paneles prefabricados, manteniendo unas buenas prestaciones técnicas e incorporando criterios de sostenibilidad y economía circular en la ejecución de los nuevos materiales de construcción más respetuosos con el medioambiente.

- 5 En algunas realizaciones, el producto de caucho es una pelota de tenis o una pelota de pádel, por ejemplo, una pelota de tenis o una pelota de pádel fuera de uso. De este modo, se consigue un material de construcción con propiedades mecánicas y de aislamiento similares a las de un material de construcción diferente en el que se reemplazan las partículas de caucho por el material conglomerante con agua.
- 10 Un ejemplo de una pelota de pádel o de tenis fuera de uso, es una pelota de pádel o de tenis con una presión interna inferior a 12 psi, 11 psi ó 10 psi, es decir, inferior a 82,7371 kPa, a 75,8423 kPa ó a 68,9476 kPa. A medida que se usan las pelotas de pádel o tenis o a medida que las pelotas de pádel o tenis pasan tiempo a presión atmosférica, la presión interior de las pelotas disminuye. Al disminuir por debajo de las presiones indicadas, la pelota de pádel o
- 15 tenis no rebota lo suficiente como para ser utilizada en partidos de pádel o tenis, por lo que, en general, se desecha la pelota.

En algunas realizaciones, cada partícula tiene un tamaño tal que la partícula puede alojarse en un cubo de 5 mm de lado y no puede alojarse en un cubo de lado menor a 4 mm.

- 20 En algunas realizaciones, el proceso comprende tamizar las partículas resultantes del triturado para separar del resto de partículas las partículas del tamaño tal que cada partícula puede alojarse en un cubo de 5 mm de lado y no puede alojarse en un cubo de lado menor a 4 mm. Este tamizado permite separar con facilidad las partículas del tamaño adecuado.

- 25 En algunas realizaciones, el proceso comprende mezclar las partículas con material conglomerante y con agua mediante la adición gradual de agua a las partículas y al material conglomerante de manera que se obtienen mezclas intermedias con distintas relaciones en peso agua/partículas del producto de caucho; y el proceso comprende agitar las mezclas intermedias. La combinación de la agitación con la adición gradual de agua, permite mejorar la unión mecánica entre las partículas de caucho y la pasta formada por el agua y el material conglomerante.

- 30 En algunas realizaciones, el proceso comprende verter la mezcla en un molde. Lógicamente, se vierte la mezcla tras añadir la cantidad completa de agua a la mezcla. El moldeo permite dar la forma deseada al material de construcción. El molde tiene una forma complementaria a una forma del material de construcción.

ES 1 300 512 U

En algunas realizaciones, el proceso comprende dejar reposar la mezcla al menos cuarenta y cinco segundos y como máximo setenta y cinco segundos desde la finalización de la agitación hasta el vertido en el molde. Se deja reposar la mezcla tras haber añadido la cantidad completa de agua a la mezcla. En general este reposo permite que la mezcla se asiente, de manera que se mejore la homogeneidad de las propiedades mecánicas de la matriz sólida de agua con material conglomerante.

En algunas realizaciones, el proceso comprende hacer vibrar el molde, estando la mezcla en el molde. La vibración del molde permite, en aquellos casos en los que la mezcla es fraguable, acelerar el fraguado de la mezcla.

10 Los diferentes aspectos y realizaciones de la invención definidos anteriormente pueden combinarse entre sí, siempre que sean mutuamente compatibles.

Las ventajas y características adicionales de la invención se harán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada y se señalarán particularmente en las reivindicaciones adjuntas.

15 **BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención de acuerdo con ejemplos de realizaciones prácticas de la misma, se acompaña como parte integrante de la descripción, un juego de dibujos en el que, con carácter ilustrativo, se ha representado lo siguiente:

20 La figura 1 muestra esquemáticamente un panel de acuerdo con algunas realizaciones de la invención.

La figura 2 muestra esquemáticamente un panel de acuerdo con algunas realizaciones de la invención.

25 La figura 3 muestra esquemáticamente un panel de acuerdo con algunas realizaciones de la invención.

DESCRIPCIÓN DE REALIZACIONES DE LA INVENCION

A la vista de esta descripción y figuras, el experto en la materia podrá entender que la invención ha sido descrita según algunas realizaciones preferentes de la misma, pero que múltiples variaciones pueden ser introducidas en dichas realizaciones preferentes, sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

ES 1 300 512 U

En algunas realizaciones, el material de construcción comprende escayola de tipo A o yeso de construcción de tipo B, agua y fragmentos de pelotas de pádel y/o pelotas de tenis, teniendo los fragmentos de las pelotas caucho. El yeso es uno de los materiales conglomerantes más usados y con más fuerte arraigo en las tradiciones constructivas. Debido a los diferentes sistemas de fabricación y a los diferentes aditivos (compuestos químicos) que mejoran y ajustan el producto a las exigencias del mercado, existe una gran variedad de yesos. En algunas realizaciones, se ha utilizado un yeso E-35 utilizado generalmente para elementos prefabricados, pasta de agarre y trabajos de repaso y acabado. La tabla 1 muestra características de un yeso E-35. En la fecha de presentación de esta solicitud este yeso está disponible comercialmente como yeso E-35 de IBERYOLA. El yeso E-35 de IBERYOLA tiene marcado N de AENOR y está clasificado según la UNE-EN 13729-1:2009 como "conglomerante a base de yeso para construcción" de tipo A:

Tabla 1

Conductividad térmica (W/mK)	Resistencia al fuego	Resistencia a flexión (N/mm ²)	Índice de pureza (%)	Granulometría (mm)	PH	Relación en peso agua/yeso (W/Y)
0,30	A1	>3	>90	0-0,2	>6	0,7-1

El caucho de los fragmentos de las pelotas de tenis y/o las pelotas de pádel puede ser un caucho natural vulcanizado. El caucho puede estar revestido con un fieltro de, por ejemplo, una mezcla de fibras, teniendo la mezcla de fibras un 37% de poliamida, un 13% de algodón y un 50% de lana. La relación en peso fragmentos/material conglomerante puede ser de entre 10,14% y como máximo del 20%.

Se puede ajustar la cantidad de agua empleada en la mezcla para que la relación agua/material conglomerante sea de al menos 0,7 y como máximo de 1,0.

Las figuras 1, 2 y 3 muestran ejemplos de paneles 21, 22, 23 hechos del material de construcción. Los paneles 21, 22, 23 tienen una longitud L, un ancho A y un espesor total E. El primer panel 21 tiene una primera sección 11 con forma de rectángulo. El segundo panel 22 tiene una segunda sección 12 con forma de T, teniendo la porción horizontal de la T un espesor e2. El tercer panel 23 tiene una sección 13 con forma de T superpuesta con una

ES 1 300 512 U

forma de L de manera que la porción vertical de la T coincide con la porción vertical de la L. La porción horizontal de la T del tercer panel 23 tiene un espesor e3.

En un ejemplo, el proceso de elaboración del material de construcción comprende triturar un producto de caucho como, por ejemplo, una o varias pelotas de tenis y/o pelotas de pádel. Se puede triturar manualmente o automáticamente. La acción de triturar permite obtener partículas de caucho, es decir, fragmentos del producto de caucho, con un tamaño adecuado para el material de construcción, por ejemplo, partículas de caucho con un tamaño de al menos 4 mm y como máximo de 5 mm.

Para seleccionar las partículas de caucho con un tamaño adecuado, el proceso de elaboración del material de construcción puede comprender tamizar las partículas de caucho de manera que se separen las partículas con un tamaño adecuado de las partículas con un tamaño no adecuado para el material de construcción. Por ejemplo, se pueden tamizar las partículas en un primer tamiz que bloquea el paso de partículas con dimensiones superiores a una dimensión máxima adecuada de, por ejemplo, 5 mm. A continuación, se pueden tamizar en un segundo tamiz las partículas que han atravesado el primer tamiz. El segundo tamiz bloquea las partículas con dimensiones superiores a una dimensión mínima adecuada de, por ejemplo, 4 mm. De este modo, las partículas bloqueadas por el segundo tamiz tienen un tamaño adecuado para el material de construcción.

En otra etapa del proceso de elaboración del material de construcción, se mezclan las partículas de caucho con un material conglomerante y con agua, de manera que se obtiene una mezcla con una relación en peso agua/material conglomerante de al menos 0,6 y como máximo de 1,0. El material conglomerante puede ser yeso. Se puede realizar una mezcla intermedia en seco de partículas de caucho y de yeso antes de añadir el agua a la mezcla intermedia.

Para mejorar la uniformidad de un fraguado posterior de la mezcla, el proceso de elaboración del material de construcción puede comprender añadir progresivamente agua a la mezcla intermedia y agitar la mezcla con distintas cantidades de agua añadida. La mezcla se puede agitar, por ejemplo, desplazando una paleta en el interior de la mezcla de manera que la paleta describe un movimiento con forma de ocho. La mezcla se puede agitar durante un tiempo de entre cuarenta y cinco segundos y setenta y cinco segundos para mejorar la uniformidad de la mezcla.

Para mejorar la uniformidad de un fraguado posterior de la mezcla, el proceso de elaboración del material de construcción puede comprender el dejar reposar la mezcla. Se puede dejar reposar la mezcla, por ejemplo, durante al menos treinta segundos después de una etapa de

ES 1 300 512 U

agitación de la mezcla. En general este reposo permite que la mezcla se asiente, de manera que se minimice la formación de huecos en el interior del volumen de la mezcla.

Para dar una forma concreta a la mezcla, el proceso de elaboración del material de construcción puede comprender verter la mezcla en un molde. Por ejemplo, este vertido se
5 puede realizar después de la etapa de reposo de la mezcla.

En otra etapa del proceso de elaboración del material de construcción se fragua la mezcla. Lógicamente, esta etapa está presente en los procesos de elaboración del material de construcción en los que el material conglomerante es yeso, escayola u otro material conglomerante fraguable mezclando el material conglomerante con agua. Se ha observado
10 que se obtiene un material de construcción con mejores propiedades mecánicas si se fragua la mezcla en un ambiente a una temperatura de 22°C y con una humedad relativa de 50%.

En otra etapa del proceso de elaboración del material de construcción, se puede secar la mezcla fraguada, por ejemplo, en un ambiente a 40°C. Este secado permite mejorar la resistencia térmica del material de construcción.

15 Este proceso de elaboración del material de construcción permite que productos prefabricados hechos del material de construcción obtenido por dicho proceso cumplan la norma UNE-EN 14246:2007 "Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo."

Se pueden realizar distintos tipos de placas dependiendo del fabricante, aunque a
20 continuación se expone un ejemplo concreto de un proceso de elaboración concreto de un producto hecho del material de construcción. En primer lugar, se mezcla en seco la cantidad de yeso necesaria para la fabricación de placas con un 14% en peso de residuo de pelotas de pádel con respecto al yeso. Posteriormente se añade una cantidad de agua tal que la relación en peso agua/yeso es igual a 0,7 en la mezcla seca. A continuación se amasa una
25 pasta resultante de añadir el agua a la mezcla seca durante un minuto según lo establecido en la norma UNE-EN 13279-2:2014 "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo".

Se deja reposar la pasta durante treinta segundos y seguidamente se vierte en los moldes de la placa en tres tandas, dando unos cinco golpes entre tanda y tanda para que el espesor y
30 distribución del residuo sea lo más uniforme posible en toda la superficie del molde. A continuación, se enrasa la placa para que la superficie enrasada quede lisa.

ES 1 300 512 U

Durante el fraguado de las placas, pueden instalarse los mecanismos metálicos necesarios para la fijación de las placas, por ejemplo, cuadradas o rectangulares, a los elementos de sujeción del techo.

5 Una vez secas, las placas admiten cualquier tipo de mecanización, pintura o preparación superficial. Siendo el conjunto un sistema sencillo, limpio y de fácil montaje.

El material de construcción obtenido se ha ensayado según la Norma UNE-EN 13279-2:2006 "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo", cumpliendo con los mínimos establecidos en dicha norma.

10 La invención se puede aplicar como compuesto de yeso o como material para fabricación de piezas prefabricadas de construcción, así como: paneles para divisiones interiores, o placas para falsos techos.

La forma del componente prefabricado resulta adaptable, siendo generalmente cuadrada o rectangular para los tabiques, falsos techos; y siendo la forma más singular para las molduras.

15 En este texto, el término "comprende" y sus variantes (como "comprendiendo", etc.) no deben entenderse de forma excluyente, es decir, estos excluyen la posibilidad de que lo descrito incluya otros elementos, pasos, etc.

20 Por otra parte, la invención no está limitada a las realizaciones concretas que se han descrito sino abarca también, por ejemplo, las variantes que pueden ser realizadas por el experto medio en la materia (por ejemplo, en cuanto a la elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.), dentro de lo que se desprende de las reivindicaciones.

ES 1 300 512 U

REIVINDICACIONES

1. Material de construcción aislante que comprende:

- una mezcla de agua y material conglomerante, siendo la relación en peso agua/material conglomerante de al menos 0,6 y como máximo de 1,0; y
- 5 - partículas de caucho, siendo la relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante de al menos un 10% y como máximo de un 20%; estando la relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante definida como:

$$r = \frac{m_p}{m_c}$$

10 donde:

r : es la relación en peso entre las partículas de caucho y el material conglomerante,

m_p : es la masa total de las partículas de caucho del material de construcción y

m_c : es la masa total del material conglomerante del material de construcción,

caracterizado por que cada partícula de caucho se encuentra adherida a un fieltro.

15

2. El material de construcción de la reivindicación 1, siendo el material conglomerante anhidrita, yeso y/o escayola.

3. El material de construcción de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, siendo la relación en peso agua/material conglomerante de al menos 0,6 y como

20

4. El material de construcción de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, teniendo cada partícula de caucho un tamaño tal que la partícula puede alojarse en un cubo de 5 mm de lado y no puede alojarse en un cubo de lado menor a 4 mm.

5. El material de construcción de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, siendo las partículas fragmentos de pelotas de tenis y/o de pelotas de pádel.

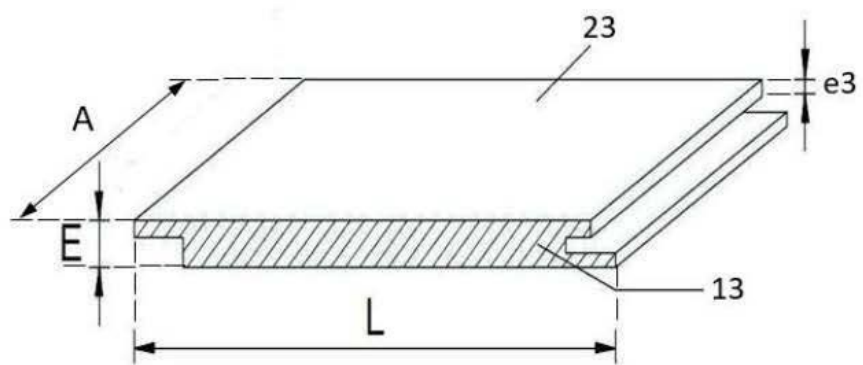
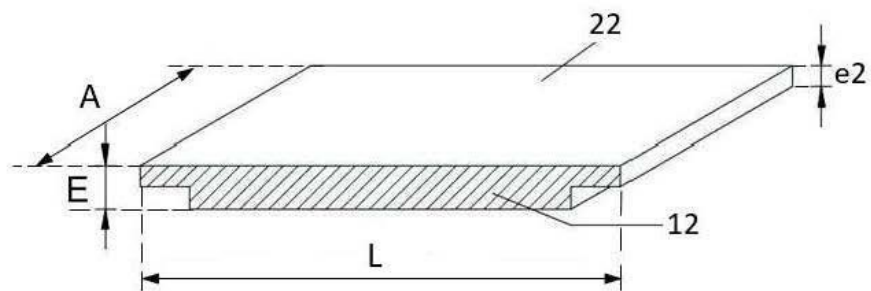
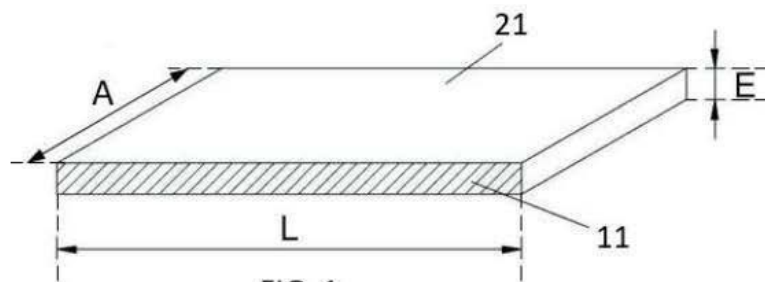
25

6. El material de construcción de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, teniendo las partículas de caucho una densidad menor que una densidad de la mezcla de agua y material conglomerante.

ES 1 300 512 U

7. Panel (21), comprendiendo el panel (21) el material de construcción de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.


ES 1 300 512 U





C) Premios


2024. 2º premio en el Simposio de Doctorado UPM.


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

 POLITÉCNICA

 EID ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO / UPM

 otriUPM OBSERVATORIO DE RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN

 hr HR EXCELLENCE IN RESEARCH

 3MT™ THREE MINUTE THESIS

La Directora de la Escuela Internacional de Doctorado de la UPM, Dña. Sonia Roig Gómez, hace constar que

Dña. MARTA RODRÍGUEZ AYBAR

del Programa de Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación

ha obtenido el **SEGUNDO PREMIO** en el Simposio de Doctorado UPM 2024, con su exposición

“Nuevos compuestos de yeso con residuos de pelotas de pádel/tenis”

TESIS EN TRES MINUTOS / THREE MINUTE THESIS

Firmado digitalmente por: ROIG GOMEZ SONIA - DNI
50179194W
Fecha y hora: 20.06.2024 14:03:54

Madrid, a veinte de junio de dos mil veinticuatro

2021. Congreso BIMIC 2021.



3rd Building and Management International Conference
3er Congreso Internacional de Gestión en Edificación

STUDY OF THE PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PLASTER WITH PADDLE BALL RESIDUES

¹Marta Rodríguez Aybar; ²Cesar Porras Amores; ³M^a Esther Moreno Fernández

¹Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid; Madrid (Spain).
E-mail: marta.rodriguez@upm.es

²Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid; Madrid (Spain).
E-mail: c.porras@upm.es

³Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid; Madrid (Spain).
E-mail: esther.moreno@upm.es

Keywords: gypsum; paddle ball residues; shore; physical-mechanical characteristics

Abstract

It is widely estimated that Spain's annual usage of 'paddle tennis' balls equals roughly 300 million balls. This results in close to 200 metric tons of discarded balls, presenting a considerable recycling challenge.

Paddle balls are difficult to recycle because they are manufactured with a 100% natural rubber core with certain chemical additives added plus epoxy resin then covered with a 70% nylon-30% acrylic yellow felt. All these ingredients have a long-life cycle, taking decades to disappear in any local landfills.

Today's ecological mindset is do not create products that produce undesirable waste, all in the goal of the circular economy to minimize waste as far as possible.

It is this reasoning that has inspired this study. The goal is how to best re-utilize this undesirable waste in a manner that other products will benefit from its characteristics in a positive manner for the circular economy.

To start we will consider the use of inexpensive resources such as those found in nature in quantity, e.g., plaster of Paris and gypsum, to mix with the waste product resulting from all these discarded paddle balls.

Plaster in the construction industry is mostly used - on a broad scale - for the finishing of interiors and prefab plaster units. Thus, the concept of reusing all this paddle ball waste, were lab analysis and research into its practical use on construction industry sites to yield positive results, makes a lot of sense.



*3rd Building and Management International Conference
3er Congreso Internacional de Gestión en Edificación*

The property of natural rubber contains a plastic that is difficult to recycle and is virtually impossible to reuse in any manufacturing process. Our thinking is to reintroduce this waste, however, into a low-cost manufacturing process that employs only mechanical transformation by crushing/shredding/pulverizing.

Should this result be positive, our project will involve adding this product to many different interior finishes on the construction site as well as to prefabricated plaster sheets or other plaster products.

In order to do these separate studies will be required for each of the ingredients listed in the second paragraph. The study of each component, adjusted for specific percentages as well as exact size counts and mix proportions, will enable us to attest the accuracy of this concept. We will also be able to compare the physical and mechanical properties using this municipal pelletization mix from paddle ball waste and plaster.

Should the result of our findings be encouraging it will be necessary to extend this research to study the most practical and inexpensive manner in which large volumes of paddle ball refuse can be retrieved for use.

The target is to end up with a product that improves sustainable building materials.

First, by reusing waste to avoid it occupying a municipal landfill or other dump site as the life cycle of paddle-ball waste is long. So, we pose ourselves the question whether this waste can be reused as a thermal additive to help buildings reduce their energy costs. We bear in mind the environment above all else, so we look towards nature and its natural resources to see if we can take advantage of this paddle-ball waste.

What we are driving at here is “the study of new plaster composites using industrial waste from paddle balls”.

By studying the physics, stress, chemical, mechanical, and thermal properties of these composites using assay norms approved by UNE [1], [2], the Spanish Association for Standardization (La Asociación Española de Normalización). We expect the results of these exhaustive tests to indicate possibly new applications for plaster composites and laminates using this waste.

We will not ignore environmental impact as we forge ahead thinking in terms of the circular economy where a reduction in natural resources will be offset by the benefit of reusing this discarded paddle-ball waste.

Several studies have studied mixing plaster with waste products [3], [4] or additions [5], [6] but none has employed paddle balls. As the game of paddle gains popularity with Spain’s favourable climate there will be more and more waste and the problem will only grow year on year. By substituting a significant part of plastering use with paddle-ball waste we will be helping the environment due to the fact plaster manufacture consumes high levels of CO².



3rd Building and Management International Conference
3er Congreso Internacional de Gestión en Edificación

The end goal we seek is to use paddle-ball waste as a plaster composite in the construction industry to improve sustained development, to recycle waste with a long-life cycle, and to boost the circular economy.

References

- [1] UNE-EN 102-039-85. (1985) Yesos y escayolas de construcción, Determinación de la Dureza Shore C, y de la dureza Brinell. AENOR.
- [2] UNE-EN 13279-2. (2009) Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. AENOR.
- [3] Ana Jiménez Rivero, Ana Guzmán Báez, Justo García Navarro, Construction and Building Materials, New composite gypsum plaster - Ground waste rubber coming from pipe foam insulation., (2014) Vol. 59, 293,105-124, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>
- [4] Paola Villoria Sáez; Mercedes del Río Merino; Evangelina Atanes Sánchez; Jaime Santa, ASCE Library, " Viability of Gypsum Composites with Addition of Glass Waste for Applications in Construction", (2019), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002604](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002604).
- [5] M.Murat; A.Attari, Cement & Concrete Research, Modification of some physical properties of gypsum plaster by addition of clay minerals,(1991), [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90019-E](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90019-E)
- [6] Jun Jiand, Fan de Yong, Jun Li, Construcción & Building, "Preparation and hardened properties of lightweight gypsum plaster based on pre-swelled bentonite". (2020) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.181>.

2022. Congreso CITE 2022.

VII International Conference on Technological Innovation in Building

STATISTICAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTER EMPLOYING NEW WASTE MATERIALS FROM DISCARDED TENNIS & PADEL TENNIS BALLS

¹Marta Rodríguez Aybar; ¹Álvaro Pérez Raposo, ¹Cesar Porras Amores; ²M^a Esther Moreno Fernández

¹Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Juan de Herrera, 6, 28040, Madrid (España); marta.rodrigueza@upm.es; alvaro.p.raposo@upm.es; c.porras@upm.es;

²Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Juan de Herrera, 4, 28040, Madrid (España); esther.moreno@upm.es

Keywords: *Plaster or gypsum, Waste, Tennis and padel tennis balls, Recycling, Carbon*

Abstract

Building construction is one of the many industries with an outside carbon footprint due to its hefty use of energy, natural resources and waste generation. This explains why many construction material experts are seeking solutions and means to reduce the industry's footprint promoting more eco-friendly buildings. Among these efforts we can highlight research into new building materials from waste products, too. Several waste-based research projects underway incorporate new waste from construction[1, 2] itself as well as from other industrial sectors[3, 4], from agriculture [5], mining, and other varieties of sports.

Collectively, tennis and padel sports dump around 300 million used tennis balls annually across all Spain. This corresponds to roughly 200 metric tonnes of discarded, wasted balls a year... creating a serious recycling challenge.

If we consider building materials and how their use can present an interesting opportunity for treating, recovering and re-employing waste material, the goal of this specific research targets the reduced use of raw materials in the construction industry by incorporating waste products discarded by sports.

In our research we create new gypsum compounds using the different waste products resulting from discarded tennis and padel tennis balls. We measure their principal mechanical properties in comparison to the norms required in the current national building standard [6] for equivalent building materials.

Concluding that building plaster products formed with this type of waste is viable per the current standard when we conduct precise engineering in the variables used, we note certain mechanical properties of the plaster read better than those of standard plaster offered today *without* this waste additive. In order to establish the optimum dosage and characteristics of the plaster compound, statistical measuring analysis has been performed to determine the effect each of the following variables has on the mechanical values of the material:

- Ratio of water to plaster/gypsum
- Type of discarded ball waste (outer felt, rubber, mixture of both)
- Percentage of waste introduced
- Size of waste used

Our results reflect the most significant variables pinpointing this difference are the water-to-plaster ratio and the type of waste used, followed by the percentage of ball waste used. The bending and compression strength of the compound increase when we reduce the water-to-plaster ratio and the percentile of waste additive. With an 0.7 water-to-plaster ratio we note the percentage of waste used is important as it causes sharp fluctuations to the extent that the benefits of other variables can be compromised.

Our preliminary analysis of mechanical readings indicates that the results we have at hand are of significant statistical value as the graph dispersion subject to non-controllable factors is tiny. One can see in Figure 1 below an example of the mechanical properties we studied:

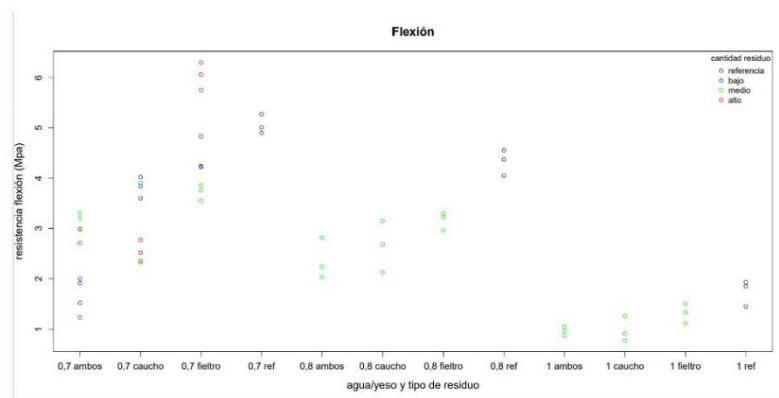


Figure 1. Bending behaviour according to the different variables introduced.

References

- [1] Santos Jiménez, R., *Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles* (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (España)). , 2018. Doi: 10.20868/UPM.thesis.53564
- [2] Beldjilali, S., et al., *Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick*. Construction and Building Materials, 2020. 259: p. 120416. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120416
- [3] Flores Medina, N. and M.d.M. Barbero-Barrera, *Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic*

2023. Congreso CITE 2023.

VIII International Conference on Technological Innovation in Building

STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF PLASTER WITH POLYAMIDES.

¹ Marta Rodríguez-Aybar; ¹ Manuel Alejandro Pedreño-Rojas; ¹ César Porras-Amores; ² M^a Esther Moreno Fernández.

¹Dpto. de Construcciones Arquitectónicas y su Control. E.T.S. de Edificación. Universidad Politécnica de Madrid. Av. Juan de Herrera, 6. 28040, Madrid. marta.rodrigueza@upm.es
alejandro.pedreno@upm.es c.porras@upm.es

² Grupo de Análisis e Intervención en Patrimonio Arquitectónico. E.T.S.de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Juan de Herrera, 4, 28040, Madrid (España); esther.moreno@upm.es

Keywords: *building materials; Fibbers; Mechanical properties; plaster.*

Abstract

Disposal of industrial waste is a key factor in the ongoing fight to protect our planet, as it has been followed in the 2030 Agenda guidelines, among others [1]. In this study, residue from polyamide sheets, used in the felt coating of padel balls, has been analyzed. It is a waste material resulting, in large quantities, during the manufacture process, resulting a non-reusable residue with no possibility of being reincorporated into the production process of the balls. In that sense, this research aims to dispose of this residue by incorporating it, as fibers, in the generation of new eco-efficient composites for construction, trying to improve some of the properties of conventional products [2],[3]. To do this, this work mixes the polyamide fibers, crushed to a size of 5mm, with gypsum plaster as binding material. Also, physical-mechanical properties of the new plasters are studied, with different water/plaster ratios and different percentages of fibers. Thus, new materials are obtained that can be usefully employed as cladding or prefab interior finish for buildings will help the circular economy to reduce the unnecessary consumption of natural raw material resources.

References

- [1] *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*. www.mdsocialesa2030.gob.es, 2030.
- [2] Gutiérrez-González, S., et al., *Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties*. *Construction and Building Materials*, 2012. 34: p. 179-185.
- [3] Tasán Cruz, D.M., *Caracterización de morteros de yeso reforzados con fibras recuperadas de eslingas textiles de un solo uso*. 2011.

2023. Congreso EDIFICATE 2023.

EDIFICATE2023

II NATIONAL CONGRESS AND
I INTERNATIONAL CONGRESS OF ADVANCED SCHOOLS BUILDING ENGINEERING AND TECHNICAL ARCHITECTURE
GRANADA, November, 9-10, 2023
Advanced Technical School for Building Engineering
University of Granada

Recycled materials with vulcanized rubber waste

Rodríguez Aybar, Marta, Pedreño Rojas, Manuel Alejandro, Porras-Amores, César y
Moreno Fernandez, M^a Esther

Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Edificación, Av. de Juan de Herrera, 4-6,
28040 Madrid. marta.rodrigueza@upm.es, alejandro.pedreno@upm.es, c.porras@upm.es,
esther.moreno@upm.es

Abstract

The United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO) urges governments and organizations to carry out global activities to reaffirm their commitment to the preservation and protection of the environment, in the promotion of environmental awareness. In this sense, the Spanish Council of Ministers approved the Spanish Circular Economy Strategy and Action Plans on 2020, where the environmental goals for the next decade were addressed under the banner of "Spain Circular 2030". In this study, the residues of vulcanized rubber from excess rubber foil material, used in the paddle ball manufacturing process, were analysed. Rubber residue cannot be recovered within the production cycle because it has become a different material with altered thermostable characteristics (now thermolabile). The main objective of this research is to incorporate this waste in the development of new recycled materials for building applications, trying to improve some of the properties of conventional products. For it, this work mixes the vulcanized rubber, crushed to a size up to 5 mm, into a gypsum binder matrix. The physical and mechanical properties of the new materials are studied, with different water/gypsum ratios and different percentages of aggregate. Thus, new materials are obtained that can be usefully used as coatings or prefabricated interior finishes for buildings, helping the circular economy, reducing the unnecessary consumption of natural resources and raw materials. Future investigations should explore the porosity and workability using lower w/g ratios to improve the mechanical properties of the material, as that is a key property when industrializing precast products are developed.

Keywords: Recycled material; Waste; Mechanical properties; Gypsum.

Recycled materials with vulcanized rubber waste

1. Introduction

Since the end of the 20th century and up to the present, policies are being activated that promote the elimination of waste, the manufacture of less polluting products and, ultimately, an economic development that preserves the current and future planet. This is manifested in the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda (Agenda 2030).

Due to the large consumption of natural resources and the large amount of waste generated by construction, it is one of the most responsible sectors in increasing its carbon footprint. For this reason, more and more studies and research are concerned with finding materials and products that promote sustainability in the construction sector.

On the other hand, plaster is the oldest binder used in construction, decoration, medicine and even food. According to Almagro Gorbea (Almagro 1986), "plaster is one of the most used materials and one with the strongest roots in our construction traditions". According to Ahmed et al. 15 million tons of gypsum waste are generated annually in the world (Ahmed, Ugai, and Kamei 2011). This fact demonstrates the relevance of this material, which has led many researchers to replace part of the raw material with waste from different sources, thus also improving some of its properties.

Some of these jobs use construction waste as aggregates in the mixes. Along these lines, Santos Jiménez et al. They incorporate ceramic waste, making the absorption and surface hardness improve compared to the reference compound (Santos Jiménez 2018). For their part, Villoria-Sáez et al. evaluated the use of glasses from carpentry, achieving an improvement in the mechanical properties of the pastes (Sáez et al. 2019).

Other investigations use industrial residues, improving the thermal and fire behavior of plasters (Binici and Aksogan 2017; Barbero-Barrera, Flores-Medina, and Pérez-Villar 2017; Jiang et al. 2019). For their part, polymers are responsible for the generation of large amounts of waste that is very difficult to eliminate, which is why various authors have used them as aggregates in gypsum matrices to obtain new interior lining materials, prefabricated materials, and mortars, with improved mechanical and thermal properties (Zhu et al. 2018; Ramos and Mendes 2014; San-Antonio-González et al. 2015; Bouzit et al. 2021) (Serna et al. 2012).

There have been several works, articles and investigations that incorporate rubber as residue in the plaster matrix. Among which include:

The study carried out by (Jiménez Rivero, de Guzmán Báez, and García Navarro 2014) where they highlight that the greater the percentage and size of rubber (from insulating shells), due to the formation of micropores, the shore hardness, the density and the mechanical resistances decrease considerably.

On the other hand (Herrero, Mayor, and Hernández-Olivares 2013) investigate the behavior of plaster mixtures with 50%, 60% rubber (residue from used tires) observing a decrease in flexural and compression resistance; adjusting the values to a curve that follows a law, allowing to predict the mechanical behavior based on the percentage of rubber used. The addition of this material, by 30%-40%, improves the density, mechanical resistance and, above all, the acoustic and thermal behavior.

Like their colleagues, (Serna et al. 2012) they use rubber waste from tires in their articles, resulting in the mixture of plaster with rubber reducing flexural resistance by 16% and compressive strength by 18.3%. , although they meet the minimum requirements. In addition, it also decreases the surface hardness of the plaster and gives it a dark color tone.

Several researchers (Herrero, Mayor, and Hernández-Olivares 2013), in different investigations during the years 2016-2019, who study the behavior of the plaster/rubber mixture according to the dosage and granulometry in plasterboard. Affirming that the greater the amount and size of rubber, the less workability and homogeneity of the compound. The density decreases in all the compounds studied, thus being lightened plasters. A composite material is obtained by improving the thermal and acoustic properties, as well as the toughness. On the other hand, the resistance to flexion and compression are diminished

So far, no results have been found for plaster-rubber mixtures from the manufacture of paddle tennis balls. La Comunidad

Rodríguez Aybar, Marta, Pedreño Rojas, Manuel Alejandro, Porras-Amores, César y Moreno Fernandez, M^a Esther

2. Objective

On the other hand, it is considered important to highlight that in Spain the annual use of paddle balls amounts to approximately 30 million, which means about 20 tons of waste whose decomposition in a landfill would take about 50 years. Therefore, it is essential, given the high and growing demand for the use of paddle tennis balls, to analyze the feasibility of using this waste to obtain building elements that at the same time contribute to the reuse of said waste and the promotion of sustainable construction. Thus, considering that construction materials and their applications can be a viable option for the treatment, recovery and reuse of this waste, the objective of this research is to reduce the consumption of raw materials in the construction sector by incorporating waste from the sports sector in gypsum compounds.

3. Methodology

3.1. Materials

Due to the different manufacturing systems and the different additives used in the plasters, there is a great variety of them. In this research, an E-35 plaster classified as type A has been used according to (13279-1:2009 2009); Water that complies with the characteristics established in UNE EN 13279-2 (13279-2:2014 2014) and vulcanized rubber waste from the excess material of the rubber sheet used in the manufacturing process of paddle tennis balls, reduced to a size of 5mm (Figure 1).



Figure 1: Remains of rubber sheet previously and once crushed to 5mm.
Fuente: Elaboración propia (2022)

3.2. Materials

Several 40*40*160mm test tubes were made following the UNE EN 13279-2 (13279-2:2014 2014) standard. Divided into 3 series with 3 test tubes each, as shown in Table 1. Two water/gypsum (w/y) ratios were used: 0.8 and 0.7, chosen based on what was established by the manufacturer. Likewise, different percentages of addition were used (10%, 14% and 20%) according to previous studies such as those carried out by Morales-Segura et al. (Morales-Segura, Villoria-Sáez, and Caballo-Bartolomé 2020) and Guna et al. (Guna et al. 2021). The residue size is 5mm, obtained from a simple mechanical crushing. A reference series without residue (series 0) was performed for each a/y ratio, in order to be able to perform comparisons.

Table 1. Preparation of test tubes of the different compounds

	Designation	% Waste	A/Y Ratio
Serie 0	REF0.8	0	0.8
	REF0.7		0.7
Serie 1	0.8R10	10%	0.8
	0.8R14	14%	
	0.8R20	20%	
Serie 2	0.7R10	10%	0.7
	0.7R14	14%	
	0.7R20	20%	

Recycled materials with vulcanized rubber waste

3.3. Test methods

The tests have been carried out in the Construction Materials laboratory of the Higher Technical School of Building of the Polytechnic University of Madrid (UPM).

Following the UNE EN 13279-2 (13279-2:2014 2014) standard, the test tubes were conditioned for 7 days at laboratory room temperature of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ and humidity around $50\% \pm 5\%$. They are then dried in an oven at $40 \pm 2^\circ\text{C}$ until constant weight, subsequently carrying out the following physical-mechanical tests:

-Dry Apparent Density: according to the UNE-EN 1936 (1936:2007 2007) standard. This is determined by the relationship between the dried weight of the test tube and its volume.

-Superficial hardness, Shore C: according to the UNE 102042:2014 (102042:2014 2014) standard, taking the reading of the pressure exerted with the durometer in ten different areas of each test tube (5 points on each face) and taking the average of said measurements as final value.

-Bending resistance: the test was carried out according to the provisions of the UNE EN 13279-2 (13279-2:2014 2014) standard. This test consists of breaking three test tubes, for each of the evaluated mixtures, using the 3-point method.

-Compression resistance: it is given by the breakage of the six semi-specimens obtained in the bending test. Said resistance values are reached by dividing the maximum applied load (breaking load) by its application area ($40 \times 40 \text{ mm}$) [18].

Both the bending and compression tests were carried out with an Iberest Autotest 200-10SW unit, connected to digital control equipment.

-Scanning Electron Microscopy (SEM): An FEI TENE0 microscope was used to carry out the SEM analysis of the new casts.

4. Results

4.1. Dry bulk density

The results of dry apparent density are reflected in Figure 2. In this line, it is shown that the density varies, first of all, depending on the A/Y ratio. Hence, the compounds with an A/Y= 0.7 are more dense compared to those with a higher water content. The lowest density of the series was 0.8R10, being 4.85% lower than that obtained for the paste ref.0.8.

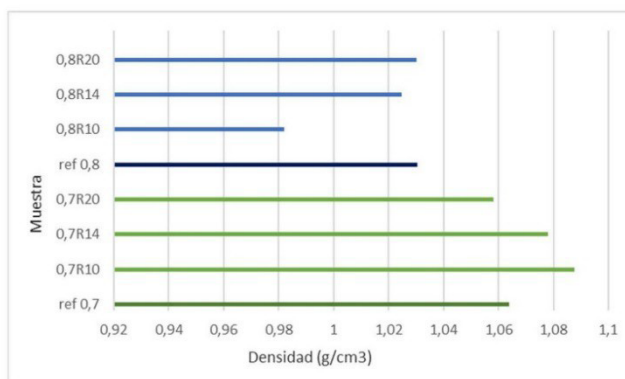


Figure 2: Dry bulk density of gypsum compounds.
Fuente: Elaboración propia (2023)

Rodríguez Aybar, Marta, Pedreño Rojas, Manuel Alejandro, Porras-Amores, César y Moreno Fernandez, M^a Esther

4.2. Shore C hardness

As we can see in Table 2, which presents the results of Shore C hardness, with a higher A/Y ratio, surface hardness decreases. On the other hand, as we increase the percentage of residue, the surface hardness increases. Reaching the 0.8R20 mixture a value 2.30% higher than the ref. 0.8. In this line, the highest surface hardness was achieved with the sample 0.7R20 (81.07) and the one with the lowest hardness was ref.0.7 (72.33).

Tabla 2. Shore C hardness of compounds

Designation	A/Y ratio	Shore C hardness	Δ (%) of surface hardness with respect to the reference
ref 0.8	0.80	72.33	0.00
0.8R10	0.80	72.50	0.23
0.8R14	0.80	73.80	2.03
0.8R20	0.80	74.00	2.30
ref 0.7	0.70	80.57	0.00
0.7R10	0.70	80.65	0.09
0.7R14	0.70	80.89	0.39
0.7R20	0.70	81.07	0.62

4.3. Bending strength

Figure 3 presents the flexural strength results. It shows that the increase in the percentage of rubber residues in the compounds resulted in a decrease in the flexural strength of the mixtures, in most cases compared to their corresponding reference pastes (same A/Y ratio). However, the best result (5.06 N/mm²) was obtained for the compound Ref.0.7. All compounds are above the 1 MPa minimum for gypsum mortars.

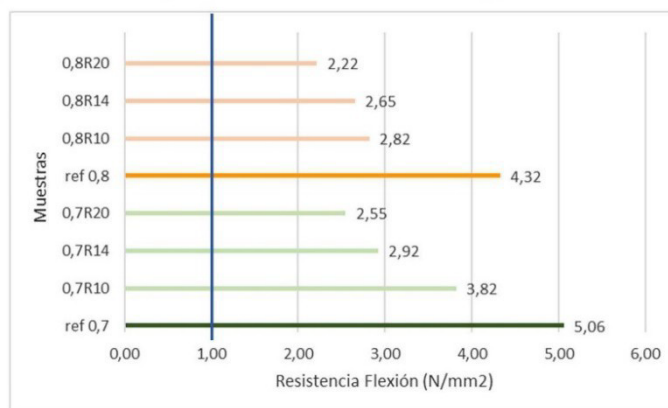


Figure 3: Flexural strength of plaster compounds.
Fuente: Elaboración propia (2023)

4.4. Compressive strength

The behavior achieved for the compressive strength of the compounds, as shown in Figure 4, is very similar to those obtained in the flexural strength. They improve their resistance, based on a lower water/plaster ratio. All the mixtures triple the minimum value of 2 MPa required for plaster mortars, according to the UNE-EN 13279-1 standard. Therefore, all compounds can be used as mortars or mixes for precast building elements.

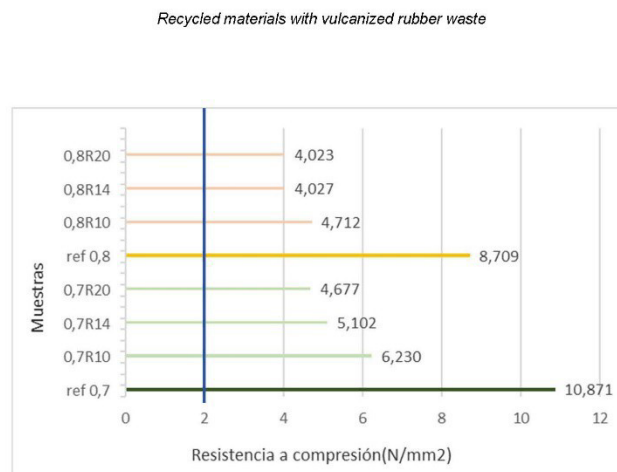


Figure 4: Compressive strength of plaster compounds.
Fuente: Elaboración propia (2023)

4.5. Scanning electron microscopy (SEM)

A microstructural analysis has been carried out, using an FEI TENE0 scanning electron microscope, to justify the results obtained during the mechanical characterization of the new compounds (Figure 5). As expected, the reference compound had a continuous and homogeneous crystalline structure with hardly any porosity. With the incorporation of rubber, a lack of interlocking in the structure is observed.

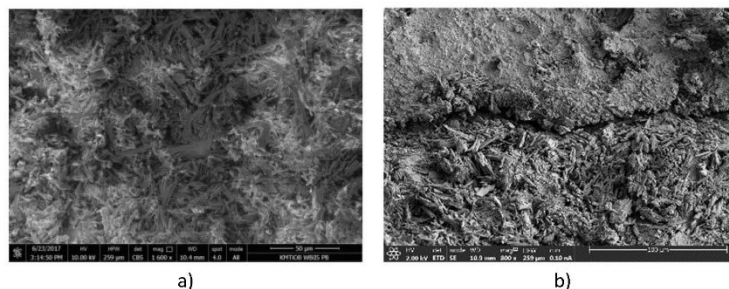


Figure 5: Scanning electron microscopy a) plaster without residue; b) plaster with rubber.
Fuente: Elaboración propia (2023)

5. Conclusions

With the data obtained in the experimental phase, on the compounds used in this work, it can be concluded:

-In all cases, the water/gypsum ratio influences the dry bulk density. On the other hand, the increase in rubber content, in general, decreases the density, with the lightest mixture being 0.8R10 (0.98 g/cm³).

-The addition of rubber in the mixture increased the surface hardness in all cases, compared to its references.

-In the mechanical tests, the flexural and compressive strengths with the highest results (5,860 MPa and 10,06 MPa) were obtained for the Ref 0.7 mix.

In this way, new plaster pastes were obtained where, by replacing part of the plaster with rubber waste from the manufacture of paddle tennis balls, it contributes to environmental sustainability and the promotion of a circular

Rodríguez Aybar, Marta, Pedreño Rojas, Manuel Alejandro, Porrás-Amores, César y Moreno Fernández, M^a Esther

economy. Thus, in addition to discharging this residue, CO₂ emissions resulting from the plaster manufacturing process are reduced.

The results included in this article could be very useful to update the educational programs of the subject in master's degrees related to construction materials within the civil-building field. Among these qualifications, it is worth highlighting those taught at the Escuela Técnica Superior de Edificación (ETSEM) of the Universidad Politécnica de Madrid (<https://www.edificacion.upm.es/masteres>).

References

- 1936:2007, UNE-EN. 2007. 'Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total'.
- 13279-1:2009, UNE-EN. 2009. 'Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. AENOR.'
- 13279-2:2014, UNE-EN. 2014. 'Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo'.
- 102042:2014, UNE EN. 2014. 'Ensayo Dureza Shore C'.
- Agenda, Ministerio de Derechos Sociales y. 2030. 'Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)'; www.mdsocialesa2030.gob.es.
- Ahmed, Aly, Keizo Ugai, and Takeshi Kamei. 2011. 'Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement', *Construction and Building Materials*, 25: 208-17.
- Almagro, Antonio. 1986. "El yeso, material mudéjar." In.: Instituto de Estudios Turolenses.
- Barbero-Barrera, María del Mar, Nelson Flores-Medina, and Víctor Pérez-Villar. 2017. 'Assessment of thermal performance of gypsum-based composites with revalorized graphite filler', *Construction and Building Materials*, 142: 83-91.
- Binici, Hanifi, and Orhan Aksogan. 2017. 'Insulation material production from onion skin and peanut shell fibres, fly ash, pumice, perlite, barite, cement and gypsum', *Materials Today Communications*, 10: 14-24.
- Bouzit, S., F. Merli, M. Sonebi, C. Buratti, and M. Taha. 2021. 'Gypsum-plasters mixed with polystyrene balls for building insulation: Experimental characterization and energy performance', *Construction and Building Materials*, 283: 122625.
- Guna, Vijaykumar, Chandan Yadav, B. R. Maithri, Manikandan Ilangoan, Francois Touchaleaume, Benjamin Saulnier, Yves Grohens, and Narendra Reddy. 2021. 'Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance', *Journal of Building Engineering*, 41: 102433.
- Herrero, S., P. Mayor, and F. Hernández-Olivares. 2013. 'Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars', *Materials & Design*, 47: 633-42.
- Jiang, Jun, Zhongyuan Lu, Jun Li, Yong Fan, and Yunhui Niu. 2019. 'Preparation and hardened properties of lightweight gypsum plaster based on pre-swelled bentonite', *Construction and Building Materials*, 215: 360-70.
- Jiménez Rivero, Ana, Ana de Guzmán Báez, and Justo García Navarro. 2014. 'New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation', *Construction and Building Materials*, 55: 146-52.
- Morales-Segura, Mónica, Porrás-Amores, César, Paola Villoria-Sáez, and David Caballol-Bartolomé. 2020. 'Characterization of Gypsum Composites Containing Cigarette Butt Waste for Building Applications', 12: 7022.

Recycled materials with vulcanized rubber waste

- Ramos, F. J. H. T. V., and Luis Claudio Mendes. 2014. 'Recycled high-density polyethylene/gypsum composites: evaluation of the microscopic, thermal, flammability, and mechanical properties', *Green Chemistry Letters and Reviews*, 7: 199-208.
- Sáez, Paola Villoria, Mercedes del Río Merino, Evangelina Atanes Sánchez, Jaime Santa Cruz Astorqui, and César Porras-Amores. 2019. 'Viability of Gypsum Composites with Addition of Glass Waste for Applications in Construction', 31: 04018403.
- San-Antonio-González, Alicia, Mercedes Del Río Merino, Carmen Viñas Arrebola, and Paola Villoria-Sáez. 2015. 'Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour', *Construction and Building Materials*, 93: 57-63.
- Santos Jiménez, R. 2018. 'Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles ', (Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (España)).
- Serna, Ángel, Mercedes del Río, José Gabriel Palomo, and Mariano González. 2012. 'Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres', *Construction and Building Materials*, 35: 633-41.
- Zhu, Cong, Jianxin Zhang, Jiahui Peng, Wenxiang Cao, and Jiagsen Liu. 2018. 'Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers', *Construction and Building Materials*, 163: 695-705.

A.2: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Este anexo incluye los análisis estadísticos realizados una vez terminada la 1ª fase experimental, con el objetivo de analizar la significancia de las variables tenidas en cuenta en las probetas fabricadas. Concretamente incluye resultados de los modelos ANOVA descritos en el apartado 5.2.3.

La Tabla 24 muestra los parámetros ajustados de cada modelo (resistencia a la flexión/compresión), donde se pudo apreciar la importancia de los efectos principales, así como las interacciones de primer y segundo orden.

Efectos	Valor estimado (MPa)		Valor p de <i>la prueba t</i>	
	Resistencia a la flexión	Resistencia a la compresión	Resistencia a la flexión	Resistencia a la compresión
w/y=0,7	5.1 ± 0.2	10,9 ± 0,2	0.0000	0.0000
w/y=0,8	4.3 ± 0.2	8,7 ± 0,2	0.0000	0.0000
w/y=1,0	1.7 ± 0.2	3,5 ± 0,2	0.0000	0.0000
caucho	1,0 ± 0,3	-0.3 ± 0.3	0.0031	0.3319
caucho+fietro	-2.5 ± 0.3	-6,2 ± 0,3	0.0000	0.0000
cantidad de residuo=baja	-2.8 ± 0.3	-5.2 ± 0.3	0.0000	0.0000
cantidad de residuo=media	-0,5 ± 0,3	-1.9 ± 0.3	0.1199	0.0000
w/y=0,7	0,9 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0.0083	0.0407
w/y 0,8 + fietro	-1.5 ± 0.4	-1.1 ± 0.5	0.0011	0.0254
w/y 1,0 + fietro	0,9 ± 0,4	2,0 ± 0,5	0.0457	0.0001
w/y 0,8 + Caucho	0,4 ± 0,4	1.5 ± 0.5	0.3638	0.0028
w/y 1,0 + Caucho	1.4 ± 0.4	3,9 ± 0,5	0.0031	0.0000
W/Y 0,8 + Caucho y fietro	0,7 ± 0,4	1.4 ± 0.5	0.1194	0.0044

w/y 1,0+0,9 y fieltro	1.1 ± 0.4	2.2 ± 0.5	0.0152	0.0000
Caucho	1.2 ± 0.4	3.2 ± 0.5	0.0077	0.0000
Fieltro + cantidad de residuo baja	-1.1 ± 0.4	-1.0 ± 0.5	0.0158	0.0476
Caucho + cantidad de residuo baja	1.8 ± 0.4	3.5 ± 0.5	0.0002	0.0000
Fieltro + cantidad de medio residual	-3.1 ± 0.4	$-3,9 \pm 0,5$	0.0000	0.0000
w/y 0,8 + Caucho + Cantidad de residuo baja	-1.9 ± 0.6	-4.1 ± 0.7	0.0038	0.0000
w/y 0,8 + fieltro + cantidad de medio residual	2.5 ± 0.6	2.1 ± 0.7	0.0002	0.0033

Tabla 24. Parámetros ajustados del modelo de resistencia a la flexión y a la compresión.

Los gráficos diagnósticos de las hipótesis del modelo ANOVA de resistencia a la flexión se muestran en la Figura 83.

En el primer gráfico (izquierda), no se observa estructura en los residuos, ni una dispersión aproximadamente regular a lo largo de los valores ajustados, por lo que pueden considerarse homocedásticos (teniendo la misma varianza). El segundo gráfico (derecha) muestra que los cuantiles de residuos no difieren significativamente de los normales y, por lo tanto, la hipótesis de normalidad de los residuos puede considerarse satisfecha. Una prueba de normalidad de Shapiro en los residuos da un valor p de 0.0735, lo que corrobora la conclusión anterior.

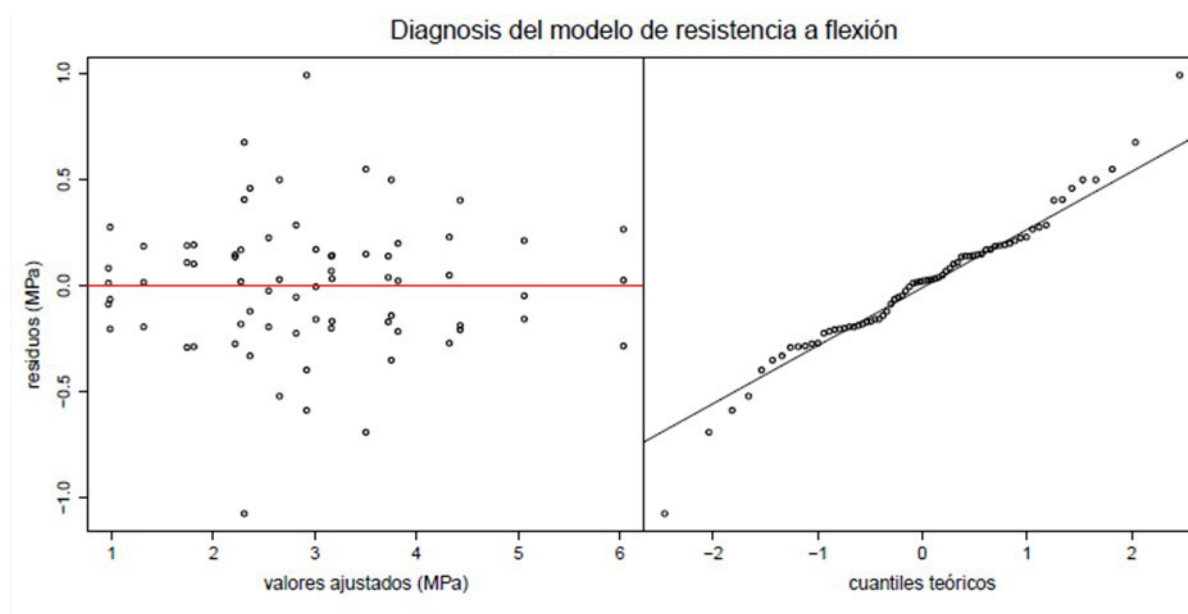


Figura 83: Gráficos de diagnóstico para el modelo ANOVA de tres vías para la resistencia a la flexión en función del agua/yeso, el tipo de residuo y la cantidad de residuo. Residuos contra valores ajustados (izquierda). QQ gráfico de los residuos (derecha).

Los gráficos de diagnóstico de resistencia a la compresión son similares a los anteriores y se muestran en la Figura 84. El primer gráfico muestra que los residuos pueden considerarse homocedásticos. El segundo gráfico sitúa la distribución de residuos cerca de lo normal.

La prueba de normalidad de Shapiro aplicada a los residuos da un valor p de 0,1194, lo que corrobora la conclusión anterior.

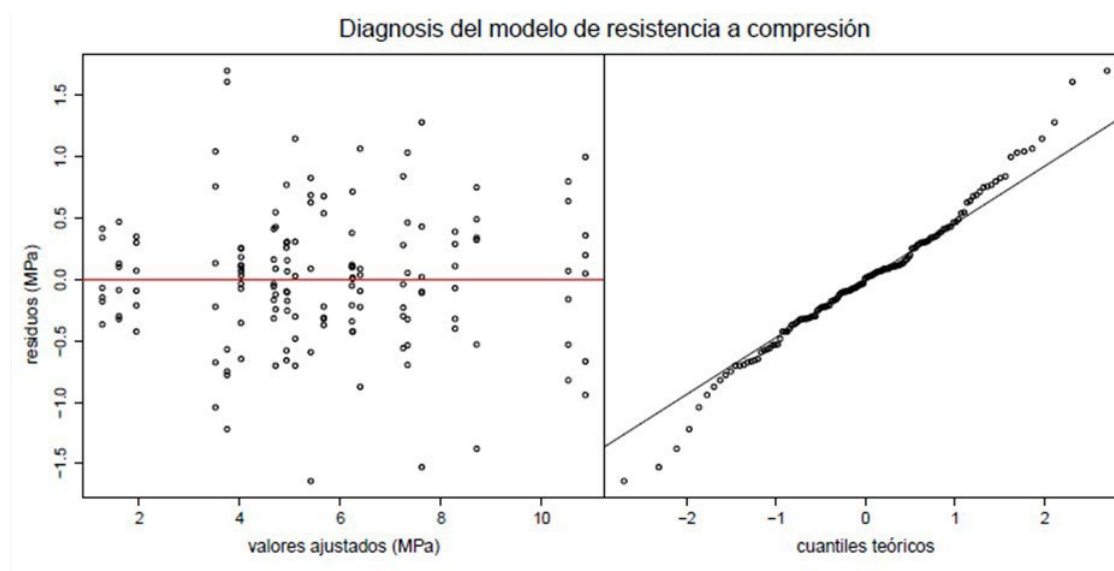


Figura 84: Gráficos de diagnóstico del modelo ANOVA de tres vías para la resistencia a la compresión en función del agua/yeso, el tipo de residuo y la cantidad de residuo. Residuos contra valores ajustados (izquierda). QQ gráfico de los residuos (derecha).

Además de las variables controladas en el laboratorio (relación agua/yeso, tipo de residuo y cantidad de residuo), se compararon las variables medidas (resistencias a flexión/compresión, dureza superficial y densidad) para identificar y cuantificar su interrelación. La Figura 85 muestra los seis acoplamientos posibles entre las cuatro variables.

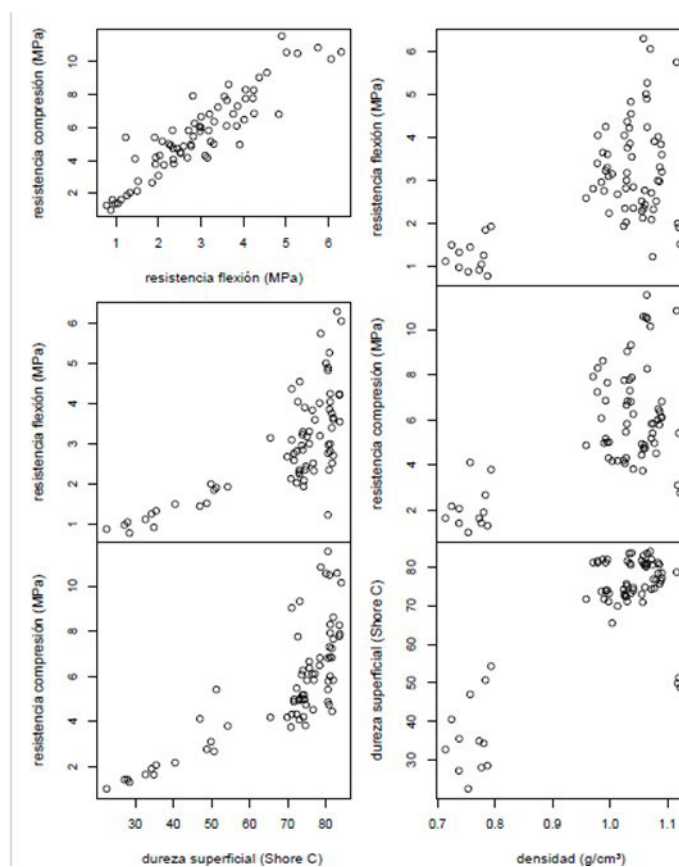


Figura 85: Izquierda: resistencia a la compresión en función de la resistencia a la flexión (arriba) y ambas propiedades mecánicas en función de la dureza de la superficie. Derecha: resistencia a la flexión, resistencia a la compresión y dureza superficial, dependiendo de la densidad de cada muestra.

El gráfico de resistencia a la flexión/compresión apunta a una relación lineal entre ambas variables, apoyada por el alto valor del coeficiente de correlación lineal (0,91). Los valores confirman que la relación entre la resistencia a la compresión y a la flexión es similar cuando las muestras incorporan residuos y cuando no.

Los dos gráficos de resistencias a la flexión / compresión contra la dureza de la superficie tienen una apariencia similar a la indicada anteriormente. Lo más destacado de ambos gráficos es la agrupación de los puntos en dos zonas claramente separadas, una para las piezas de ensayo con una dureza inferior a 60 unidades y otra con una dureza superior a 60.

Este aspecto mostró que las propiedades mecánicas (flexión y compresión) aumentan más intensamente cuando la dureza superficial excede el valor mencionado.

Pero son las gráficas de las tres variables en función de la densidad las que aportan la mejor explicación del efecto diferenciado que los residuos producen sobre las propiedades de los compuestos estudiados. La nube de puntos se divide en dos grupos claramente separados debido a la densidad. De baja densidad se consideran a aquellas con densidad menor a 0.85 g/cm³ y probetas de alta densidad a aquellas por encima de 0.95 g/cm³. Aparentemente sus respuestas en flexión, compresión y dureza son significativamente diferentes con esta clasificación.

Un análisis de la varianza de cada una de estas variables en términos de alta o baja densidad justifica completamente el uso de la densidad como factor diferenciador.

La Tabla 25 muestra la estimación de la dureza a flexión, compresión y superficial en función de la agrupación por alta o baja densidad y el error residual de estas estimaciones.

Variable de respuesta	Baja densidad	Alta densidad	Error residual	valor p
Resistencia a la flexión (MPa)	1.3 ± 0.3	3.3 ± 0.1	1.0	0.0000
Resistencia a la compresión (MPa)	2.4 ± 0.5	6,7 ± 0,3	2.0	0.0000
Dureza superficial (Shore C)	39 ± 2	76 ± 1	8	0.0000

Tabla 25: ANOVA entre densidades y propiedades mecánicas

El valor p en los tres casos indica que el resultado es altamente significativo ($p < 0,05$). Por lo tanto, la densidad es el factor que, por sí mismo, tiene más influencia en el resto de las propiedades mecánicas. Este análisis indica que la densidad es un factor determinante en las propiedades mecánicas de los yesos con estos residuos. Conviene, pues, relacionar la densidad con las variables controladas en laboratorio. La Figura 86 muestra que son de baja densidad las probetas con relación agua/yeso de 1, mientras que son de alta densidad las de relación 0.7 y 0.8, independientemente de si se ha añadido o no residuo, el tipo de residuo o la cantidad de este.

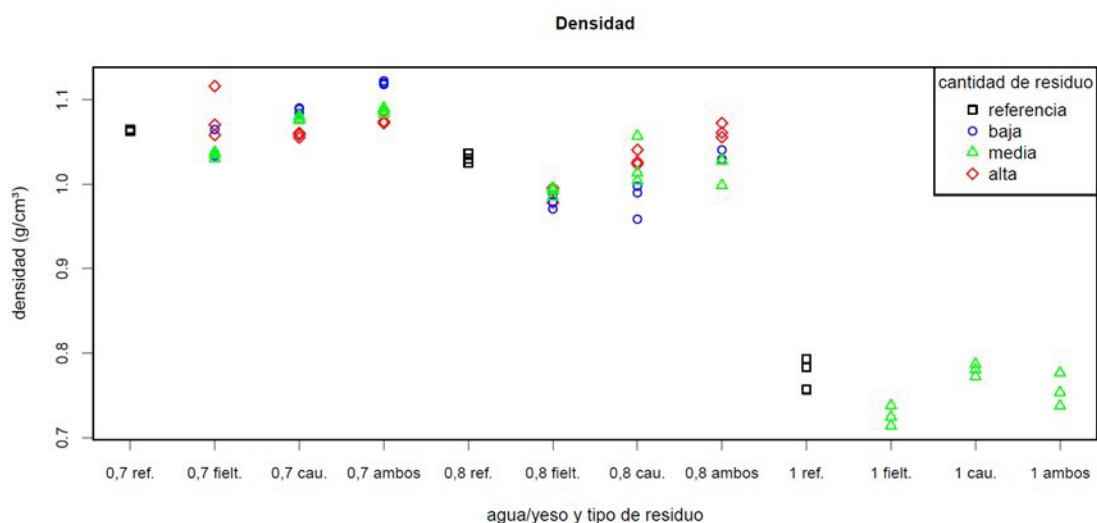


Figura 86: Densidad de las probetas en función de la relación agua/yeso, del tipo de residuo y de la cantidad de residuo.

Este análisis indica que la densidad es un factor determinante en las propiedades mecánicas de los yesos con estos residuos y debe considerarse al diseñar elementos constructivos que requieran propiedades de ligereza. La densidad es una indicación de la relación agua/yeso.

