



REFLEJOS DEL RECICLADO

NUEVOS PANELES COMPOSITE EN FACHADA VENTILADA

Azucena Sanjuán Sánchez



REFLEJOS DEL RECICLADO

Nuevos paneles composite en fachada ventilada.

Estudiante:

Azucena Sanjuán Sánchez

Tutor:

Eduardo Lahoz Ruíz

Aula o6 TFG

Coordinador: Eduardo Pesquera González

Adjunto: Alejandro Bernabeu Larena

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Semestre de Otoño, 2023.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Eduardo Lahoz Ruíz, que ha demostrado un gran interés por ayudarme e infinita paciencia.

A Ana María Guerrero Bustos (IETcc-VALREC) por su apoyo a la hora de facilitarme los residuos utilizados en este trabajo.

A Javier Fernández, Fernando Mondéjar y Francisco Serrano, del laboratorio del DIT, por su ayuda en la realización de los ensayos.

A mi familia y amigos, por acompañarme durante estos años, en especial a mi madre por su apoyo constante.

“La estética sólo nos interesa si podemos explorar nuevas técnicas, formas y materiales en los edificios, porque no solo disfrutamos de los resultados sino de los procesos para llegar a ellos”.

Iñaki Ábalos, IV Congreso Internacional: “Arquitectura: Cambio de Clima” de la Fundación Arquitectura y Sociedad, 2016.

ÍNDICE

RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	11
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	12
PARTE 1: ESTADO DEL ARTE	14
1.1. LA ARQUITECTURA DE LOS RESIDUOS	14
1.1.1. La sostenibilidad en la construcción.....	14
1.1.2. Análisis del Ciclo de Vida	19
1.1.3. Declaración Ambiental de Producto	20
1.1.4. Residuos de la construcción y demolición.	20
1.1.5. Legislación aplicable	26
1.1.6. Economía circular	27
1.2. LA ARQUITECTURA Y EL ACABADO ESPEJO	34
1.2.1. Historia del espejo como material en la arquitectura	34
1.2.2. El acabado espejo. Ejemplos de arquitecturas.....	37
1.3. PANELES COMPOSITE DE ALUMINIO EN FACHADA VENTILADA	39
1.3.1. Fachada ventilada: soporte y lienzo del edificio	39
1.3.2. Antecedentes e inicios del Panel Composite de Aluminio (PCA)	40
1.3.3. Definición y Características del Panel Composite de Aluminio.....	42
1.3.4. Evaluación de sistemas de revestimiento fachada ventilada y PCA..	46
PARTE 2. TRABAJO EXPERIMENTAL	49
2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS	50
2.1.1. Residuos de la Construcción y Demolición (RCD).....	50
2.1.2. Cemento natural de rápido fraguado	50
2.1.3. Chapas de aluminio con acabado espejo.....	52
2.2. PROCESO DE CREACIÓN DEL NÚCLEO CON RCD	53
2.2.1. Cálculo del tiempo de fraguado del cemento natural.....	53
2.2.2. Cálculo de la mezcla necesaria para cada probeta.....	53
2.2.3. Preparación de las probetas	55
2.3. ADHESIÓN CON CIANOACRILATO	64

2.3.1.	Características del adhesivo utilizado.....	64
2.3.2.	Método de trabajo. Fases.....	64
2.3.3.	Resultados del trabajo.	65
2.4.	ADHESIÓN CON EPOXI.....	66
2.4.1.	Características del adhesivo utilizado	66
2.4.2.	Método de trabajo. Fases.....	66
2.4.3.	Resultados del trabajo.	68
2.5.	ENSAYO A TRACCIÓN	68
2.5.1.	Método de trabajo del Ensayo: Fases.....	68
2.5.2.	Resultados del trabajo	70
2.6.	ESTUDIO PRELIMINAR DE LA DILATACIÓN TÉRMICA	77
2.7.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE PESO/UD.SUPERFICIE	79
CONCLUSIONES		81
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....		83
BIBLIOGRAFÍA.....		85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Barrio Residencial: “Resource Rowls”, De Leander Group, en Copenhague (Dinamarca).....	16
Ilustración 2. Detalle de la pared con ladrillos verticales y horizontales.....	16
Ilustración 3. Esquema simplificado del proceso futuro del sector de la construcción, basado en la economía circular.	19
Ilustración 4. Composición de los RCD.....	25
Ilustración 5. Etapas del Ciclo de Vida del Producto.	30
Ilustración 6. Economía Circular en la Construcción.	30
Ilustración 7. La Galería de los Espejos del Palacio de Versalles.	34
Ilustración 8. Parque Urbano en la azotea de Dan Graham.....	35
Ilustración 9. “Two adjacent pavilions” (1978).....	36
Ilustración 10. “The Spiral” diseñado por Bjarke Ingels Group, 2023.....	36
Ilustración 11. Casas de espejos en Bolzano (Italia).	37
Ilustración 12. Edificio de Sitges (España).	38
Ilustración 13. Frente Marítimo de Las Palmas de Gran Canaria (España).....	38
Ilustración 14. Casa del Pueblo, Clichy (Francia).....	41
Ilustración 15. Edificio ALCOA, Pittsburgh (Estados Unidos).	41
Ilustración 16. Lámina de aluminio con acabado de espejo.	46
Ilustración 17. RCD empleados.....	50
Ilustración 18. Características del Panel Composite con acabado espejo.	53
Ilustración 19. Encofrado Fijo.	56
Ilustración 20. Encofrado móvil/desmontable.....	56
Ilustración 21. Primer encofrado esquina 90º.....	62
Ilustración 22. Segundo encofrado esquina 90º.....	63
Ilustración 23. Composiciones visuales con espejo en esquina.....	63
Ilustración 24. Núcleo RCD.....	65
Ilustración 25. Resultado de la prueba.....	65
Ilustración 26. Imágenes de las fases del proceso.....	67
Ilustración 27. Imágenes de la fase previa del ensayo.	69
Ilustración 28. Imágenes del ensayo en el Laboratorio.....	70
Ilustración 29. <i>Imágenes del ensayo en el Laboratorio</i>	72
Ilustración 30. <i>Imágenes del ensayo en el Laboratorio</i>	74
Ilustración 31. Imágenes con los paneles resultantes del ensayo.	75
Ilustración 32. Dilatación Térmica.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Residuos de Construcción y Demolición generados al año. Datos 2021	23
Tabla 2. Tratamiento de Residuos Minerales de Construcción y Demolición.	24
Tabla 3. Análisis Comparativo entre Materiales para el Recubrimiento de Fachadas.....	43
Tabla 4. Características del Cemento Natural vs el Cemento Portland	52
Tabla 5. Probetas Realizadas.	59
Tabla 6. Resultados de las Probetas de RCD mixto.	71
Tabla 7. Resultados de las Probetas de RCD hormigón.	73
Tabla 8. Resultados de las Probetas de RCD cerámico.	75
Tabla 9. Estudio viento en zona urbana Madrid.	77
Tabla 10. Dilatación Térmica.....	78
Tabla 11. Comparación de Paneles Composite de Aluminio diferentes marcas.....	79

RESUMEN

La construcción sostenible tiene por objetivo minimizar todos los impactos ambientales que se generan a lo largo del proceso de construcción, realizando un uso eficiente de la energía y el agua, utilizando materiales de construcción y recursos naturales no perjudiciales para el medio ambiente, y una adecuada gestión de los residuos.

La mayoría de los procesos constructivos actuales se rigen por un esquema lineal de consumo: construir – utilizar – desechar; lo que conlleva el gran problema de tener que gestionar los numerosos y crecientes residuos derivados de la construcción y demolición. La economía circular, o en este caso la “arquitectura circular”, pretende resolver esta cuestión, construyendo a partir de materiales desechados, reciclados o reconvertidos y con ello reducir el consumo de materias primas y de gestión de residuos.

Este Trabajo de Fin de Grado investiga las posibilidades de aplicar residuos de la construcción y demolición en paneles composite para fachadas ventiladas con revestimiento de acabado espejo. Este acabado aporta unas cualidades únicas al entorno donde se aplica, duplicándolo y distorsionándolo.

En el marco de esta investigación, se ha logrado encapsular residuos de la construcción y demolición de manera efectiva, dentro de un núcleo de paneles composite, y lograr una buena adherencia a las chapas metálicas. Posteriormente, se ha realizado un ensayo de tracción con el propósito de evaluar la cohesión entre ambos elementos, resaltando la integración de materiales reciclados en un contexto arquitectónico sostenible.

Los resultados del trabajo experimental respaldan la hipótesis, concluyendo que los paneles desarrollados, aunque muestran menor resistencia a tracción en comparación con paneles composite existentes en el mercado, presentan una muy buena cohesión interna. Esto constituye un primer paso favorable para, una vez que se definiera el tipo de fijación, determinar la resistencia frente al viento de sistemas de fachada ventilada basados en estos paneles.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el panel se alinea con los principios de construcción sostenible y economía circular, en consonancia con las directrices de la Unión Europea. En este contexto, se propone una futura línea de investigación centrada en actualizar el Documento de Evaluación Europea para evaluar las prestaciones de los paneles composite creados con residuos de la construcción en relación con sus características esenciales.

Palabras Clave: #paneles composite #RCD #espejo #reflejo #residuos #economía circular

ABSTRACT

Sustainable construction aims to minimize all environmental impacts generated throughout the construction process, by efficiently using energy and water, using environmentally friendly building materials and natural resources, and proper waste management.

Most current construction processes are governed by a linear consumption scheme: build - use - dispose; which leads to the major problem of having to manage the numerous and growing wastes derived from construction and demolition. The circular economy, or in this case "circular architecture", aims to resolve this issue, building from discarded, recycled or reconverted materials and thereby reducing the consumption of raw materials and waste management.

This final degree project investigates the possibilities of applying construction and demolition waste in composite panels for ventilated facades with a mirror finish coating. This finish provides unique qualities to the environment where it is applied, duplicating and distorting it.

Within the framework of this research, it is possible to encapsulate construction and demolition waste effectively within a core of composite panels, and to achieve a good adhesion to the metal sheets. Subsequently, a tensile test was carried out in order to evaluate the cohesion between both elements, highlighting the integration of recycled materials in a sustainable architectural context.

The results of the experimental work support the hypothesis, concluding that the panels developed, although they show lower tensile strength compared to existing composite panels on the market, have very good internal cohesion. This constitutes a favorable first step to determine the wind resistance of ventilated façade systems based on these panels, once the type of fastening is defined.

From a sustainability perspective, the panel is aligned with the principles of sustainable construction and circular economy, in line with European Union guidelines. In this context, a future line of research focused on updating the European Assessment Document to evaluate the performance of composite panels created with construction waste in relation to their essential characteristics is proposed.

Key Words: composite panels #CDW #mirror #recycling # reflection #circular economy

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en la fusión de dos elementos en apariencia divergentes: “los Residuos de Construcción y Demolición” y “el acabado de espejo”. Se pretende aprovechar el potencial de los residuos procedentes de la construcción y demolición y hacerlo converger con el llamativo mundo del acabado espejo.

Los Residuos de Construcción y Demolición, a menudo pasados por alto en su potencial transformador, representan una oportunidad única para repensar un enfoque hacia la sostenibilidad en la construcción. En paralelo, el acabado espejo para fachada, con su elegancia luminosa y capacidad de distorsión física de la realidad, invita a contemplar la arquitectura con una perspectiva renovada.

El propósito intrínseco de esta investigación es explorar la síntesis entre estos dos elementos aparentemente inconexos, aplicados en paneles composite para su uso en revestimientos de fachada ventilada o en interiores, para idear soluciones que integren funcionalidad, sostenibilidad y estética. A medida que los desechos de la construcción dan paso a una nueva forma de expresión arquitectónica, el espejo se presenta como impulsor de una transformación visual que redefine la apariencia del entorno construido.

Si bien, las envolventes arquitectónicas sostenibles e innovadoras, era el tema inicial de este Trabajo Fin de Grado, tras la experiencia adquirida en mi año universitario de intercambio en Ciudad de México donde estudié la asignatura “Técnicas y materiales” en la que nos introdujeron acerca de la implementación de materiales sostenibles para la construcción y pudimos realizar diferentes ensayos de laboratorio, decidí enfocarlo en el uso de residuos de construcción y demolición aplicados en paneles composite con acabado espejo.

En ese año de intercambio adquirí nuevos conocimientos, no solo en el ámbito académico sino también en el ámbito personal, tras descubrir una cultura sorprendente y conocer personas y lugares muy diferentes. Así, uno de esos lugares ha servido de inspiración inicial al presente trabajo, la fachada con acabado espejo del “Centro Expositor de Puebla” (México), siendo elegida como portada del mismo.

Este Trabajo Fin de Grado constituye una expansión de los conocimientos previamente adquiridos y tiene el objetivo de aportar mi pequeño granito de arena en el aprovechamiento de los residuos reciclados dándoles no solo un nuevo uso sino también una apariencia visual distinta.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La hipótesis general que se establece para el desarrollo de este trabajo es determinar una metodología preliminar para la caracterización de paneles composite de aluminio con núcleo de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y acabado espejo para su empleo en revestimiento de fachadas y paramentos interiores, en especial en fachadas ventiladas.

En base a dicha hipótesis, se establecen como objetivos:

- Crear un prototipo de panel composite basado en chapas espejo y un núcleo capaz de ser fabricado por laminación (elemento plano) y explorar otras posibilidades formales tales como esquinas rectas y curvas.
- Encapsular RCD en el núcleo.
- Una vez confirmada su viabilidad preliminar de fabricación, estudiar una serie de propiedades consideradas críticas.

Para cumplir dichos objetivos, se considera necesario comenzar con la realización de sendos estudios sobre el estado del conocimiento del uso de RCD en la arquitectura, de los paneles composite de aluminio y del empleo de acabado espejo en envolventes arquitectónicas.

A dichos trabajos hay que añadir la realización de ensayos a tracción para evaluar la adherencia de los paneles y una prueba de dilatación térmica sobre los núcleos de los paneles.

Por último, el estudio se concluye con el análisis de los resultados y la obtención de conclusiones finales que incluyen futuras líneas de investigación.

PARTE 1

PARTE 1: ESTADO DEL ARTE

1.1. LA ARQUITECTURA DE LOS RESIDUOS

Uno de los sectores claves en la transformación energética y la gestión de recursos es el sector de la construcción. La comunidad europea está trabajando por implementar legislación para que los procesos constructivos impliquen un mínimo impacto ecológico, reduzcan el uso de materiales o recursos no renovables, que no se puedan reciclar o requieran una gran cantidad de energía para ser extraídos, recuperados o reciclados.

En la Unión Europea, estos cambios o modificaciones en la normativa han venido reforzados con unos objetivos ambiciosos, como construir edificios de consumo casi nulo en los que el análisis del ciclo de vida no se limita a valorar el impacto de la huella de carbono.

Así, en arquitectura, esta normativa, tiene el objetivo de extender al máximo el ciclo de vida de la construcción, mediante la investigación de nuevos materiales constructivos, pero también mediante el reciclaje de residuos de la propia construcción y de su demolición, proceso en el que se centra el presente trabajo. El uso de estos residuos en la arquitectura sigue los principios de una economía circular aplicada al sector de la construcción.

1.1.1. La sostenibilidad en la construcción

La sostenibilidad se centra en el principio de asegurar las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de generaciones futuras, sin renunciar a la protección del medioambiente, el crecimiento económico y el desarrollo social. La sostenibilidad en el ámbito de la construcción implica el uso de materiales y procesos de construcción con bajo impacto medioambiental, respetuosos con el entorno, la utilización de fuentes no contaminantes, materiales naturales, reciclados o reutilizables.

El proceso constructivo de cualquier bien inmueble tiene un impacto en la economía de una sociedad, comporta el consumo de recursos naturales y energía, la creación de materiales, su transporte, emisión de contaminantes, la gestión de residuos, entre otros; pero a su vez, la preocupación social por la conservación del medio ambiente, el desarrollo sostenible y la referida economía circular ha supuesto un cambio conceptual en la propia arquitectura. Un ejemplo de esto es lo que se conoce como “Construcción sostenible”.

- **Construcción sostenible**

La construcción sostenible se caracteriza por ser respetuosa con el entorno, ahorrar recursos y consumo energético en la utilización de los materiales y en los procesos constructivos, pero a su vez, asegurar el bienestar de los usuarios.

El arquitecto e investigador Bjorn Berge¹ ha escrito y publicado numerosos artículos y libros sobre arquitectura, centrándose en temas relacionados con la sostenibilidad de los materiales de construcción y la construcción sostenible, entre sus obras se destaca "*La Ecología de los Materiales de Construcción*". Así, señala como principios de una construcción sostenible dentro del ciclo completo de vida del proceso constructivo:

- Reducir el consumo de energía mediante la optimización del rendimiento energético y maximizando el uso de energías renovables.
- Reutilizar y reciclar los materiales a lo largo de su ciclo de vida. Mejorar la gestión de residuos y reducir los costes de eliminación.
- Mejorar la calidad ambiental interior para sus usuarios, por ello se suele apostar por maximizar la iluminación natural, tener una ventilación y unos niveles de humedad adecuados, mejorar el rendimiento térmico y acústico, entre otros aspectos.

En este sentido se destaca Dinamarca como país propulsor de la construcción sostenible con el compromiso de ser neutral en carbono para el 2025. Ejemplos de arquitecturas situadas en Copenhague son el "CopenHill" en Amager Bakke, un centro urbano de deportes de montaña sobre una planta de conversión de residuos en energía que abastece a miles de hogares; y el proyecto residencial "Resource Rows", de Lendeger Group, nominado para los premios de 2022 de la Fundación Mies van der Rohe. Se compone de 92 viviendas construidas con materiales reciclados, ahorrando residuos y reduciendo considerablemente la huella de carbono. Los paneles de ladrillo de las paredes se cortaron en una sola pieza de edificios existentes.

¹ Berge, Bjorn. 2009. "The Ecology of Building Materials (La ecología de los materiales de construcción). 2aEd. Oxford: Architectural Press.

Ilustración 1. Barrio Residencial: “Resource Rowls”, De Leander Group, en Copenhague (Dinamarca).



Fuente: Fundación Mies van der Rohe.

Ilustración 2. Detalle de la pared con ladrillos verticales y horizontales.



Fuente: Fundación Mies van der Rohe.

La legislación de los últimos años también se ha preocupado por regular el ámbito de la construcción sostenible y de implementar criterios básicos de sostenibilidad. En este sentido, se cita a nivel europeo, la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios, que impulsa la construcción de edificios de consumo casi nulo; y en especial, el Reglamento nº305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción (RPC). Este último Reglamento se tratará en un epígrafe posterior.

En España, a nivel estatal, se destaca:

- Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios².
- Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética³.

Y a nivel autonómico, las diferentes comunidades autónomas también llevan regulando apartados específicos en los que se promueven la construcción sostenible y la implantación de prácticas respetuosas con el medioambiente en la contratación pública.

- **Reglamento de Productos de la Construcción (UE) n.º 305/2011. Requisitos.**

El Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, del 9 de marzo del 2011, conocido habitualmente con la siguiente denominación y siglas: Reglamento de Productos de la Construcción (RPC)⁴, por el que se establecen las condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción en la UE, define las características y requisitos esenciales que deben cumplir los edificios; entre dichos requisitos estarían la seguridad, la salubridad y la protección del medioambiente. Además, establece las reglas para que los fabricantes emitan declaraciones de conformidad, que aseguren que sus productos de construcción cumplan con las normas establecidas en la UE.

En el ANEXO I del RPC se incluyen los “*Requisitos básicos de las Obras de Construcción*” que, en referencia al presente apartado, hay que mencionar el requisito “*7º Utilización sostenible de los recursos naturales*”, donde se incide en el reciclaje de los

² BOE nº 131 de 02/06/2021

³ BOE nº 121 de 21/05/2021

⁴ Diario Oficial de la UE nº 88/2011

⁵ Anexo I del Reglamento 305/2011: *7º Utilización sostenible de los recursos naturales*

Las obras de construcción deberán proyectarse, construirse y demolerse de tal forma que la utilización de los recursos naturales sea sostenible y garantice en particular:

- a) la reutilización y la reciclabilidad de las obras de construcción, sus materiales y sus partes tras la demolición;*
- b) la durabilidad de las obras de construcción;*
- c) la utilización de materias primas y materiales secundarios en las obras de construcción que sean compatibles desde el punto de vista medioambiental.*

RCD y el uso de materias primas y materiales compatibles con el medio ambiente con el fin de garantizar la sostenibilidad de las obras de construcción.

El RPC también introdujo la obligación de que los productos de construcción relevantes lleven el marcado “*Conformité Européenne*” (CE), indicando que cumplen con los requisitos del reglamento y, por lo tanto, pueden circular libremente dentro del mercado único europeo.

El marcado CE certifica que el producto ha llevado un procedimiento de evaluación para cumplir con los requisitos esenciales. Con dicho marcado el fabricante declara que su producto cumple con la especificación técnica armonizada que le es aplicable.

Por su parte, la Evaluación Técnica Europea (ETE) es un documento que evalúa las prestaciones de un producto de construcción en función de sus características esenciales. Proporciona información necesaria para el marcado CE del producto, recogiendo las prestaciones a declarar y los detalles técnicos para la aplicación del Sistema de Evaluación y Verificación de la Constancia de las Prestaciones. Este proceso permite marcar CE a productos no cubiertos por otras normas, contribuyendo al libre movimiento de productos en el Mercado Único Europeo.

La ETE contiene información sobre el fabricante, descripción del producto, prestaciones y referencia a métodos de evaluación, indicando el Sistema de Evaluación y Verificación de la Constancia de Prestaciones (EVCP) aplicado.

Por último, dado el tema principal del presente trabajo sobre los RCD, se hace una breve referencia al concepto de “materiales sostenibles”.

- **Materiales sostenibles**

Se acude a la definición de “materiales sostenibles” por la revista de divulgación y comunicación “Construible” sobre Construcción Sostenible:

“Los materiales sostenibles del sector de la construcción son aquellos cuya elaboración y utilización implican el ahorro energético y la minimización de la contaminación, conllevando también a favorecer la salud de los usuarios” (Construible, 2023).

Asimismo, serán también sostenibles aquellos materiales tales que sean de origen natural (madera o corcho, por ejemplo), o bien que su proceso de fabricación implique una reducción de recursos naturales, tales como por ejemplo el hormigón con áridos procedentes de RCD.

1.1.2. Análisis del Ciclo de Vida

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una metodología de valoración de impactos ambientales. Su objetivo es evaluar, de forma sistemática, el impacto medioambiental de un producto o servicio, o en este caso el proceso constructivo, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final; en el proceso se identifica y cuantifica el uso de materiales, energía y las emisiones al entorno.

Ilustración 3. Esquema simplificado del proceso futuro del sector de la construcción, basado en la economía circular.



Fuente: Fundación Conama. Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018. Economía Circular en el sector de la construcción.

Para garantizar la comparabilidad de las evaluaciones del ciclo de vida, la Organización Internacional de Normalización (ISO) ha elaborado, entre otras, la ISO 14040 “Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia”, revisada en 2006.

Según esta norma, para analizar los aspectos medioambientales y el impacto ambiental potencial a lo largo del ciclo de vida de un producto se deben realizar las siguientes actividades:

- Recopilar un inventario con los movimientos de entradas y salidas del producto.
- Evaluar los posibles impactos medioambientales asociados a los movimientos de inventarios.
- Posteriormente, interpretar los resultados obtenidos de las actividades anteriores.

Aunque el método elegido por la ISO 14040 es el ACV, existen otros métodos de evaluación del impacto ambiental como la “Matriz de Leopold”, que se basa en la

identificación y evaluación del impacto de los componentes clave de un proyecto; y la “*Evaluación de Impacto Social y Ambiental*” (EISA) que amplía su evaluación al impacto social del proyecto considerando los efectos totales que puede tener en la sociedad y el medio ambiente.

1.1.3. Declaración Ambiental de Producto

La Declaración Ambiental de Producto (DAP) o la “*Environmental Product Declaration*” (EPD) es una certificación/ecoetiqueta tipo III reconocida internacionalmente y aplicable a todo tipo de productos o servicios, regulada por la mencionada ISO 14025 de 2010 y solo para productos de la construcción la norma UNE 15804.

La DAP/EPD proporciona información ambiental verificada del producto, tiene en cuenta los aspectos ambientales más significativos del ACV del producto o servicio mostrando una información objetiva y contrastable. La DAP/EPD es una declaración ambiental tipo III que se caracteriza por comunicar, pero no exigir criterios mínimos por cumplir a diferencia de otras etiquetas ecológicas.

Se ha llevado a cabo una comparación de las Declaraciones Ambientales de Producto de tres marcas ampliamente comercializadas en España, específicamente en el ámbito de paneles composite de aluminio, son Alucobond, Stacbond y Alucoil. Se observa que ninguno de estos documentos proporciona información detallada sobre la inclusión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el proceso de fabricación de los paneles. Sin embargo, se registra información relativa al final de vida de los paneles y su gestión final en dichos documentos.

1.1.4. Residuos de la construcción y demolición.

- **Definición y Clasificación**

Atendiendo a la normativa aplicable se define como **Residuo de Construcción y Demolición (RCD)**⁶ “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar y se genere en una obra de construcción o demolición”.

⁶ El Artículo 2 del Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (BOE nº 38 de 3/02/2008) define los RCD remitiéndose al artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, derogada por la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (BOE nº 85 de 9/04/2022).

Por su parte, el artículo 2 del Real Decreto 105/2008, por la que se regula producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, para definir la **Obra de construcción o demolición** incluye una extensa relación de actividades tales como:

- La construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble, en sentido amplio, de ingeniería civil.
- La realización de trabajos, como excavaciones, urbanizaciones o inyecciones, que modifiquen la forma o sustancia del terreno o del subsuelo⁷.
- Asimismo, se considerará parte integrante de la obra toda instalación que dé servicio exclusivo a la misma, y sean necesarias durante su ejecución como plantas de machaqueo, plantas de fabricación de hormigón, grava-cemento o suelo-cemento, plantas de prefabricados de hormigón, talleres de fabricación de encofrados y plantas de tratamiento de los residuos de construcción y demolición de la obra, entre otras.

La clasificación de los RCD puede realizarse según diversos criterios, según su origen:

- Residuos procedentes de puntos de extracción de áridos o de movimientos de tierras puros, residuos compuestos por materiales de origen pétreo limpios de contaminación por parte de otras sustancias de obra.
- Residuos procedentes de obras de construcción, fundamentalmente de origen pétreo y cerámico, con cantidades de otros materiales. Estos residuos pueden contener vidrio, madera, papel e incluso con sustancias tóxicas o contaminantes como pinturas, metales, etc.
- Residuos procedentes de obras de demolición, similares a los residuos de construcción, pero mucho más mezclados, más contaminados y con dificultad para realizar su separación y gestión.

También se pueden clasificar según su naturaleza, distinguiendo entre:

- Residuos inertes, denominados comúnmente como “escombros” que no sufren transformaciones físicas, químicas o biológicas de consideración. En relación con la clasificación anterior, los residuos procedentes de áridos o movimientos de tierra puros y la parte de escombros de las obras de construcción y demolición, se clasificarían como inertes, y son la mayoría de RCD.
- Residuos no peligrosos, tales como la madera, textiles, papel, yeso y parte de los metales. No son tóxicos inicialmente, pero pueden derivar en sustancias perjudiciales para el medio ambiente.

⁷ Se excluyen la gestión de los residuos de industrias extractivas regulados por la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo.

- Residuos tóxicos y peligrosos que contienen sustancias tóxicas para el ser humano y el medio ambiente. Su gestión y manipulación requieren del cumplimiento de legislación específica y que se realice por gestores autorizados.

El presente trabajo se centra en el estudio de los residuos procedentes de la construcción y demolición, en concreto residuos de hormigón, de cerámica y mixtos (cerámicos+hormigón). El sector de la construcción produce grandes cantidades de estos residuos que si se realiza una mala planificación en su gestión final pueden ser depositados de forma incontrolada en vertederos.

Según un estudio realizado por Deloitte⁸ para la Comisión Europea, sobre el uso eficiente de los recursos de los RCD, España cuenta con la infraestructura y la capacidad operativa para gestionarlos a nivel nacional. Desde la recesión económica del 2008, las instalaciones de tratamiento han sufrido una disminución en la cantidad de RCD recibidos, lo que ha supuesto que operen por debajo de su capacidad. Esta situación ha dificultado que estas instalaciones se mantengan abiertas y funcionen correctamente. A pesar de ello, España no tiene problemas para tratar fuentes específicas de residuos como hormigón, ladrillos o vidrio.

- **Datos generales a nivel europeo y nacional.**

Según el Protocolo de Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición que se enmarca en la Estrategia de Construcción 2020 publicado por la Comisión Europea⁹, los RCD representan más de un tercio de todos los residuos generados en la Unión Europea (UE), incluyendo materiales como hormigón, ladrillos, madera, vidrio, metales y plástico que provienen de la construcción y demolición de edificios e infraestructuras.

Los dos principales objetivos para la gestión de los residuos que se establecen en el citado Protocolo de la Comisión Europea son:

- Garantizar que los RCD se gestionen de forma ambientalmente racional.
- Aprovechar todo el potencial de los RCD para contribuir a la transición hacia una economía circular.

La tecnología para la separación y recuperación de residuos permite re-procesar fácilmente los componentes para convertirlos en nuevos productos o materiales, siempre que no contengan cantidades de materiales peligrosos como disolventes y amianto, que requieren un tratamiento más específico.

⁸ Deloitte, 2017, *Resource Efficient Use of Mixed Wastes Improving management of construction and demolition waste*, publicado por la Comisión Europea, en octubre de 2017

⁹ 'Protocolo de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición' dentro de la Estrategia para una competitividad sostenible del sector de la construcción y de sus empresas.

Para conocer la situación de la gestión de los RCD en los países de la UE, se han analizado los datos aportados por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea¹⁰. Este estudio se centra en documentar y comparar los impactos ambientales del tratamiento de los RCD en diferentes países de Europa. En este sentido, la reutilización de residuos de hormigón es el tratamiento que conlleva a un mayor ahorro, seguido del PVC, el aislamiento de EPS y la madera. Además, se incluye una elaboración detallada de técnicas y procesos innovadores para la gestión de los RCD.

Continuando con el referido estudio, si bien la recuperación de residuos de construcción y demolición es alta, alrededor de un 70%, la sustitución de materiales como cemento, hormigón, plástico por el reciclado es muy baja.

La situación de España en la generación total de RCD en un año se recoge en la siguiente tabla, extraída de un estudio para la UE “Recopilación de datos básicos y evaluación del ciclo de vida para la gestión de residuos de construcción y demolición”:

Tabla 1. Residuos de Construcción y Demolición generados al año. Datos 2021

Países UE	RCD total generado incluyendo suelo, balasto de vías, residuos de dragado y asfalto [t]	RCD total generado excluyendo suelo, balasto de vías, residuos de dragado y asfalto [t]	RCD per cápita generado incluyendo suelo, balasto de vías, residuos de dragado y asfalto [t/cápita]	RCD per cápita generado excluyendo suelo, balasto de vías, residuos de dragado y asfalto [t/cápita]
España	39.539.766	14.807.048	0,31	0,84

Fuente: apdo. 3.3 “Resultados relativos a la generación y composición de los RCD”

De los 29 países europeos analizados, España es el séptimo país con más RCD incluyendo suelo, balasto de vías, residuos de dragado y asfalto, sin embargo, excluyendo los materiales mencionados, se sitúa en vigésimo tercera posición, y ocupa el sexto y el décimo tercer lugar en los epígrafes de las dos últimas columnas.

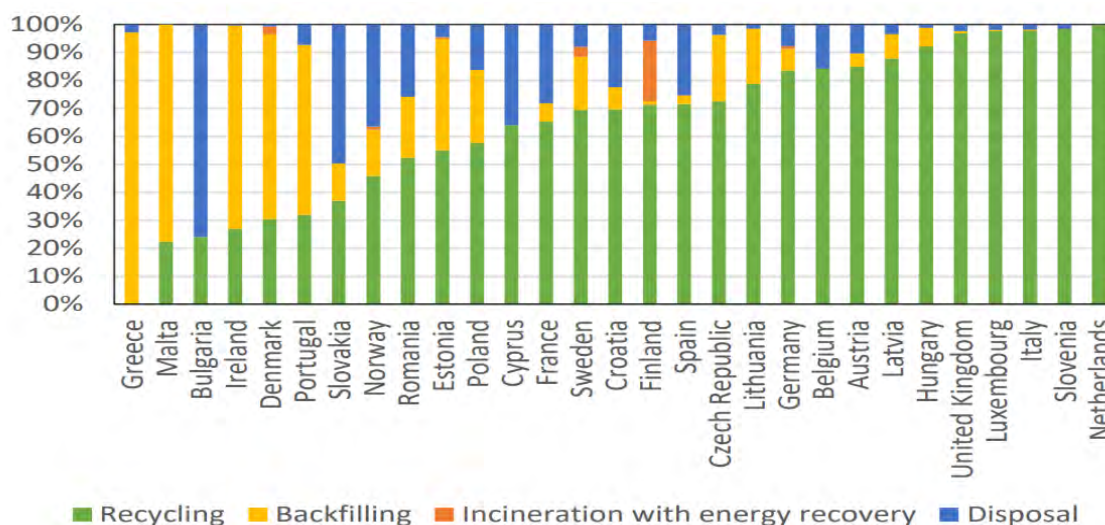
Los datos del volumen de reciclado de RCD y su tratamiento que recoge el citado estudio se muestran en la tabla siguiente¹¹, donde se distingue según el destino de los residuos:

¹⁰ Estudio para la UE sobre datos y análisis del ciclo de vida de la gestión de los RCD: “Background data collection and life cycle assessment for construction and demolition waste management”, 2022, publicado por la Comisión Europea.

¹¹ Estudio para la UE sobre datos y análisis del ciclo de vida de la gestión de los RCD, apartado: “3.4 Results regarding CDW management across EU countries”, pag. 44, “Background data collection and life cycle assessment for construction and demolition waste management”.

- Reciclaje o *Recycling*
- Reutilización (en rellenos) o *Backfilling*¹²
- Incineración con recuperación de energía o *Incineration with energy recovery*
- Eliminación o *Disposal*

Tabla 2. Tratamiento de Residuos Minerales de Construcción y Demolición.



Fuente: Publicaciones de la Unión Europea. Datos 2018

En España se recicla un 71% de estos residuos, que incluyen el tratamiento de residuos como hormigón, ladrillos, azulejos y cerámica, y un 4% se usa para "Backfilling", y un 25% se desechan de manera segura y responsable, abarca varias formas de eliminarlos que pueden incluir enterrarlos en vertederos, incinerarlos, reciclarlos o utilizar otras tecnologías de gestión de residuos.

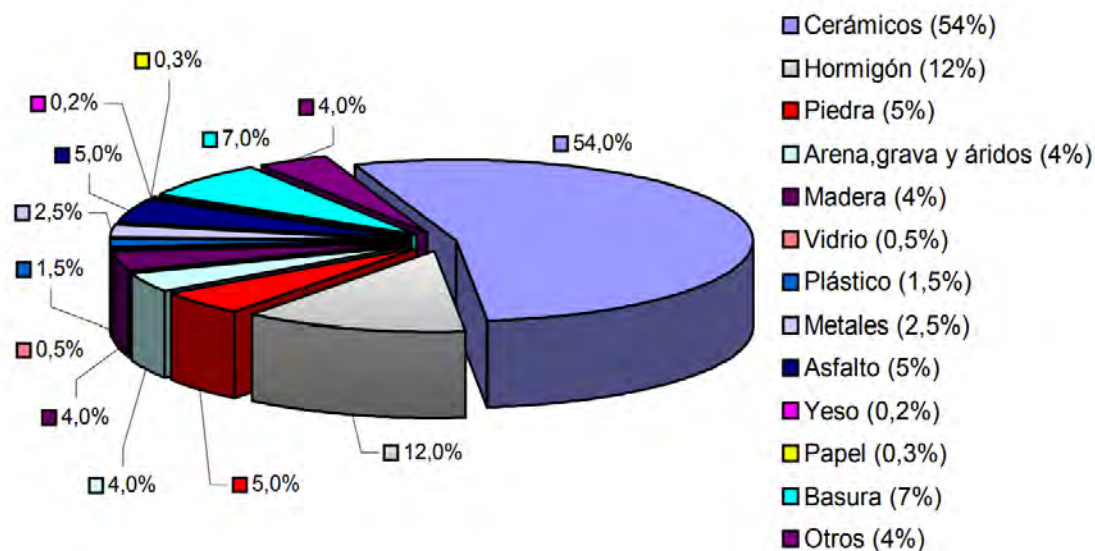
El objetivo es manejar los residuos de manera que minimicen los impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana. En el contexto de residuos sólidos, implica la eliminación final de los residuos, asegurándose de que no causen daño ambiental o representen riesgos para la salud. La gestión adecuada de los residuos es esencial para abordar problemas ambientales y promover la sostenibilidad.

Para el tratamiento del reciclado de los RCD es importante conocer el volumen de los distintos materiales que los componen puesto que como se ha expuesto anteriormente,

¹²El Backfilling significa "cualquier operación de recuperación donde se utiliza residuo no peligroso adecuado con fines de restauración en áreas excavadas o con fines de ingeniería en jardinería"(Directiva (UE) 2018/851).

pueden requerir un tratamiento diferenciado. Para conocer el porcentaje que de cada material de residuos se genera en España, se acude a los datos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas¹³ (CEDEX) que se muestran en el gráfico siguiente:

Ilustración 4. Composición de los RCD



Fuente: CEDEX. Distribución porcentual por tipo de los RCD.

Los RCD que son procesados para su reciclaje se componen de una variada serie de materiales como productos cerámicos, residuos de hormigón, madera, vidrios, etc. Estos residuos mixtos pueden tener dos orígenes muy diferentes:

- Procedentes de operaciones de demolición de estructuras de edificación, constituyen el 80%.
- En menor medida, ladrillos elaborados en fábricas que son rechazados por no cumplir las especificaciones exigidas.

Con arreglo a la legislación española, las competencias sobre el control de su producción y gestión corresponden a las Comunidades Autónomas, a excepción de los residuos procedentes de obras menores que pueden corresponder a las Entidades locales. A continuación, se expone la normativa general aplicable a diferentes niveles de competencia.

¹³ El CEDEX es un organismo público que se dedica a la investigación aplicada y al desarrollo tecnológico en el marco de la ingeniería civil y el medio ambiente. Una de sus funciones es la investigación en el marco de los materiales de construcción.

1.1.5. Legislación aplicable

A continuación, se hace una breve referencia de la normativa aplicable comenzando con las normas emanadas por la UE (Directivas) y su trasposición a nivel nacional, y a nivel autonómico, en concreto a la Comunidad Autónoma de Madrid.

A nivel europeo

La UE considera que la protección del medio ambiente y la salud humana puede ser alcanzada de forma más eficiente mediante la acción comunitaria. Por ello, y en función del principio de subsidiariedad que consagra el artículo 5 del Tratado de la UE, se han aprobado las Directivas siguientes en materia de generación y gestión de residuos:

- Directiva 2008/98/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Directiva (UE) 2018/851 Del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

Cada Estado miembro deberá aprobar las disposiciones legales oportunas para dar cumplimiento a las referidas Directivas.

A nivel estatal

La legislación y los planes nacionales sobre gestión de residuos fomentan y establecen un marco para que las Comunidades Autónomas desarrollen planes y legislación a nivel regional adaptados a su región. Como tal, España tiene tanto legislación como planes nacionales y regionales; y puede haber una variación considerable entre las regiones dependiendo de si, y cómo, han adaptado la legislación nacional. Por lo tanto, la legislación de residuos es un factor clave en el rendimiento de los RCD a nivel regional.

Se cita a continuación la normativa nacional principal:

- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular¹⁴, con la aprobación de esta Ley se pretende dar cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular a los objetivos 12 “Producción y consumo sostenibles”, 13 “Acción por el clima” y 14 “vida submarina”; teniendo por objeto sentar los principios de la economía circular a través de regulación de los residuos, la reutilización y reciclado.
- Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado¹⁵.

¹⁴ BOE nº 85 de 9/04/2022

¹⁵ BOE nº 171 de 19/06/2020

- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición¹⁶.
- Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron¹⁷.

La regulación en esta materia se completa con los Planes y Programas Estatales de RCD y de Prevención de Residuos Cuatrienales emitidos por el actual Ministerio para la Transición Ecológica y el resto demográfico.

A nivel autonómico

Como se ha expuesto anteriormente, las competencias sobre el control de la producción y gestión de los RCD corresponden a las Comunidades Autónomas.

Este Trabajo se centra en la normativa de la Comunidad Autónoma de Madrid siendo la norma de referencia Orden 2726/2009, de 16 de julio, por la que se regula la gestión de los residuos de construcción y demolición¹⁸. Clasifica a los RCD en:

- RCD de Nivel I: excedentes de la excavación y los movimientos de tierras de las obras cuando están constituidos por tierras y materiales pétreos no contaminados.
- RCD de Nivel II: no incluidos en los de Nivel I, generados principalmente en las actividades propias del sector de la construcción, de la demolición, de la reparación domiciliaria y de la implantación de servicios.

En aplicación a la citada Orden, los RCD se destinarán por este orden a operaciones de reutilización, reciclado u otras formas de valorización, y en último extremo a la eliminación.

1.1.6. Economía circular

La Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular¹⁹, vino a incorporar a nuestro ordenamiento jurídico la mencionada Directiva europea de 2018, que marcaba, dentro de sus objetivos principales, avanzar en la economía circular.

¹⁶ BOE nº 38 de 13/02/2008

¹⁷ BOE nº 254 de 21/0/2017

¹⁸ BOCM de 7/09/2009

¹⁹ BOE nº 85 de 9/04/2022

El artículo 2 de la Ley define la “Economía circular”²⁰ como:

“El sistema económico en el que el valor de los productos, materiales y demás recursos de la economía dura el mayor tiempo posible, potenciando su uso eficiente en la producción y el consumo, reduciendo de este modo el impacto medioambiental de su uso, y reduciendo al mínimo los residuos y la liberación de sustancias peligrosas en todas las fases del ciclo de vida, en su caso mediante la aplicación de la jerarquía de residuos.”

Por tanto, la legislación considera a la economía circular como el sistema para desvincular el desarrollo económico del consumo de recursos finitos. Una economía circular es restaurativa y regenerativa y trata de que los productos, componentes y materias mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento, reduciendo los residuos al mínimo.

En líneas generales, el modelo actual de economía se basa en las prácticas empresariales heredadas de la Revolución industrial, es decir que se mantendrá una oferta constante y económicamente viable de recursos naturales para todos, es decir una economía lineal consistente en “extraer, fabricar, usar y tirar”. Son muchas las organizaciones públicas y privadas, que llevan tiempo trabajando en defensa del modelo de economía circular. Merece destacar los siguientes trabajos de diferentes organizaciones.

Una de las organizaciones a nivel mundial más activas en trabajar para la creación de una economía circular es la “Ellen MacArthur Foundation”²¹, creada en el 2010, por activista que lleva su nombre, define este modelo:

“La economía circular es un marco de soluciones sistemáticas que hace frente a desafíos globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los residuos y la contaminación”

Otra de las organizaciones más críticas con el modelo económico actual es la “Green Building Council España”²²(GBCE), que en el Informe sobre “Economía circular en la edificación”, publicado en mayo de 2021, muestra al sistema económico actual, como un sistema depredador, ineficiente e insostenible en el tiempo, fundamentándose en dos grandes principios: crecimiento económico permanente y un consumo constante; que no tiene en cuenta las externalidades ambientales que genera, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas ni otros impactos ambientales. La GBCE aboga por cambiar

²⁰ Artículo 2.K Definiciones de la Ley 7/2022.

²¹ Ellen MacArthur fue conocida en 2005 por dar la vuelta al mundo en solitario más rápida, cinco años después creó la Fundación que lleva su nombre, cuyo objetivo principal es acelerar la transición hacia una economía circular.

²² La GBCE o Consejo para la Edificación Sostenible en España es una organización privada sin ánimo de lucro creada en el año 2008, cuyo objetivo principal es la transformación hacia un modelo sostenible del sector de la edificación.

el rumbo hacia un modelo de economía circular ante las consecuencias expuestas de este sistema económico actual y en concreto, dentro del sector de la edificación.

Por su parte, la “Re-thinking. Observatorio de Residuos²³”, plataforma de ámbito nacional, cuya actividad se enfoca a proyectos relativos a la gestión de residuos aborda aspectos referentes a su prevención, recogida, tratamiento y reciclaje. Re-thinking impulsa y difunde proyectos de investigación para que las Administraciones públicas y las empresas, dispongan de información de calidad para desarrollar políticas y estrategias en las que se sustente la economía circular.

La citada Fundación “*Ellen MacArthur*” define el modelo de economía circular bajo los tres principios básicos siguientes, aplicables también al sector de la edificación tal y como pone de manifiesto la asociación “Re-thinking. Observatorio de Residuos²⁴”:

- **Preservar y mejorar el capital natural** controlando las reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables.
- **Optimizar los rendimientos de los recursos** distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento, tanto en ciclos técnicos como biológicos.
- **Promover la eficacia de los sistemas detectando** y eliminando del diseño los factores externos negativos.

La economía circular busca optimizar al máximo el aprovechamiento de los recursos naturales, el ciclo de producción y la regeneración de la naturaleza. Así, distingue entre ciclos técnicos y ciclos biológicos. Los recursos se regeneran dentro del ciclo biológico o se recuperan y restauran gracias al ciclo técnico.

El consumo únicamente se produce en el ciclo biológico, donde alimentos y otros materiales de base biológica son diseñados para regresar al sistema como nutrientes, como por ejemplo la madera o el algodón. El ciclo técnico recupera y restaura productos, componentes y materiales mediante estrategias de reutilización, reparación, re-manufactura o, por último, el reciclaje.

En la ilustración siguiente se muestran las fases del ciclo completo de vida de un producto:

²³ Rethinking es una asociación privada sin ánimo de lucro que se crea al amparo de la Ley Orgánica 1/2002, de 22 de marzo, reguladora del derecho de asociación, cuyo fin principal es la generar, divulgar y fomentar información sobre la gestión de residuos, en especial residuos municipales.

²⁴ “Economía Circular” presentación de “Re-thinking”

Ilustración 5. Etapas del Ciclo de Vida del Producto.



Fuente: “Así funciona la sostenibilidad basada en datos”. Knauf Industries

La economía circular en el sector de la construcción busca transformar los procesos tradicionales, centrados en la extracción, producción y eliminación de materiales, hacia un enfoque más sostenible y eficiente. Esto implica maximizar la reutilización y reciclaje de materiales de construcción, prolongando su vida útil y reduciendo la dependencia de recursos vírgenes. Además, se promueve el diseño de edificios que faciliten la desmontabilidad y la recuperación de componentes al final de su vida útil.

Ilustración 6. Economía Circular en la Construcción.



Fuente: Instituto de Arquitectura e Ingeniería. Econova

La economía circular en la construcción no solo aborda la gestión de residuos, sino que también fomenta la innovación en materiales, métodos de construcción y prácticas arquitectónicas para lograr una industria más sostenible y alineada con los principios de cierre del ciclo de vida de los productos. Este enfoque no solo reduce la huella ambiental de la construcción, sino que también puede generar beneficios económicos y fomentar la resiliencia a largo plazo del sector.

A continuación, se muestran algunos de los proyectos más relevantes en aras de potenciar la economía circular en España.

a) Proyecto VALREC

El proyecto VALREC²⁵ lleva realizándose dos años y ha conseguido muy buenos resultados. Su objetivo es desarrollar soluciones innovadoras para “...incrementar la circularidad, trazabilidad y pureza de recursos minerales presentes en los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), y así realizar una fabricación ecoeficiente de nuevos productos de construcción” (Proyecto VALREC Economía Circular, 2022)

El proyecto VALREC pretende evitar el vertido de hasta 2 millones de toneladas al año de RCD y la reducción del 20% de la huella de carbono en las empresas. Además del GCBE, varias instituciones se hacen eco del proyecto VALREC: proyecto persigue crear un impacto económico, medioambiental y social entre los que destacan:

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja²⁶: “VALREC es uno de los dos proyectos cofinanciados en 2021 por la Comunidad Autónoma de Madrid y Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Este proyecto potencia la economía circular en los residuos de construcción y demolición (RCDs)” (Instituto Eduardo Torroja, 2022).

Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA)²⁷: “Así, desde una aproximación holística, VALREC ha superado obstáculos tecnológicos y de mercado asociados a la demolición selectiva y trazabilidad de calidades mediante la digitalización de la información, el uso de tecnologías novedosas para la obtención de materias primas recicladas de mayor pureza y calidad y mediante la incorporación de un mayor porcentaje de materias primas recicladas —hasta un 95% en peso— en nuevos productos para el sector de la construcción, incluso con mayores prestaciones. ... ha demostrado que los desafíos técnicos del reciclado de RCD son abordables con la tecnología actual y que no deberían suponer un obstáculo...” (Revista Técnica de Medio Ambiente, 2023).

La citada Revista, considera los logros obtenidos por el proyecto VALREC que se pueden sintetizar en los siguientes apartados:

- **Plataforma digital:** VALREC ha permitido desarrollar herramientas digitales para mejorar la demolición selectiva, la logística y la gestión de los RCD. Como ejemplo de resultado, destaca la publicación que se ha mejorado la trazabilidad, la optimización de las rutas de los camiones, el módulo de control de entrada en la

²⁵ Este proyecto se dio a conocer en enero de 2022, patrocinado por el Grupo Sacyr junto con otras siete empresas de la Comunidad Madrid, y es impulsado por el GBCE. Artículo publicado el 25 de enero de 2022 en la web de GBCE

²⁶ Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja publica el 27 de enero de 2022 un artículo sobre el proyecto VALREC para potenciar la economía circular en los RCD.

²⁷La Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA) publica el 27 de enero de 2022, un artículo sobre la presentación del proyecto VALREC

planta por volumen y la entrega del residuo mediante un QR o albarán personalizado.

- **Investigación industrial de nuevas tecnologías de reciclaje y procesado:** este proyecto ha permitido probar tecnologías alternativas, procedentes de otras industrias y trasladarlas al ámbito de los RCD, se ha testado con éxito la tecnología de los molinos horizontales para la limpieza de los finos adheridos a los RCDs, que hoy se utiliza para tratar los áridos naturales ya limpios.
- **Investigación de nuevos productos VALREC a partir de materia prima reciclada de RCD:** se han desarrollado nuevos productos con alto porcentaje de reciclados, como los ecoáridos, ecomorteros y ecohormigones, utilizando aditivos que mejoran su uso.
- **Construcción de un Piloto demostrador, análisis y explotación de resultados:** han permitido la mejora notable de la huella de carbono respecto a los hormigones convencionales.
- **Fin de vida:** demolición o rehabilitación. La solución planteada por VALREC consiste en una herramienta BIM²⁸ para mejorar la estimación de residuos, planificar la demolición y digitalizar la información de los RCD desde el fin de vida.
- **Transporte a la planta de gestión:** VALREC ha desarrollado un módulo de optimización de rutas que aporta mejoras de optimización teniendo en cuenta las necesidades de pobra, la disponibilidad de camiones y el coste, el tráfico y las necesidades de valorización de los RCD.
- **Gestión integral y trazabilidad de datos:** VALREC es una plataforma digital para la gestión integral de RCD.
- **Entrada en planta y planificación de la gestión:** el proyecto aporta un sistema de visión artificial que utiliza la Inteligencia Artificial²⁹ para obtener información del volumen de carga que ingresa en la planta de valorización.
- **Proceso de valorización y mejora de calidades:** la solución de VALREC pasa por un uso de tecnologías de separación densimétricas para la mejora de calidad de RCD mixtos.
- **Fabricación y puesta en obra de nuevos ecoproductos:** las mejoras aportadas dan lugar a reducciones de la huella de carbono en productos VALREC de cerca del 70% en áridos reciclados, 2% en cementos, 4% en morteros y del 13% en hormigones.

²⁸ Building Information Modeling (BIM) o modelo de la información del edificio, es una representación digital de un objeto construido.

²⁹ El proyecto VALREC utiliza expresamente el concepto de “*machine learning*” que es una técnica de aprendizaje que permite a los ordenadores realizar tareas específicas de forma autónoma sin necesidad de ser programados, es decir es una disciplina del campo de la Inteligencia Artificial que, a través de algoritmos, dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones.

b) Proyecto SOST-RCD

El proyecto SOST-RCD³⁰, busca convertir los RCD en recursos para una construcción más sostenible, que cuenta con la financiación de la Agencia Valenciana de la Innovación (AVI), está alineado con los principios de la economía circular y tiene como objetivo convertir en nuevos recursos los materiales de desecho procedentes de la construcción y la demolición (RCD), avanzando de este modo hacia una edificación más sostenible.

Siguiendo el artículo publicado por el Instituto Tecnológico de la Cerámica (ITC) sobre este proyecto, las mejoras que ha aportado en el campo de los RCD y la construcción sostenible se resumen en:

“En suma, SOST-RCD, implica un significativo impacto en la cadena de valor del sector de la construcción, además de potenciar la economía circular como modelo de negocio en el sistema de la Comunitat Valenciana. Con ellos se abre un nuevo mercado al incorporar técnicas innovadoras aún prácticamente desconocidas en el sector, que implican nuevos diseños de procesos, tratamientos y utilización de los residuos para dar una nueva vida a otro tipo de construcción y edificación que redunde en el bienestar de quienes habitan los espacios y en la implantación de nuevos modelos económicos alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.”
(Instituto Tecnológico de la Cerámica, 2021)

³⁰ En este proyecto participan el Instituto de Tecnología Cerámica (ITC-AICE), el Instituto Metalmecánico, Mueble, Madera, Embalaje y Afines (AIDIMME) y miembros del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón de la Universitat Politècnica de Valencia (ICITECHA-UPV).

1.2. LA ARQUITECTURA Y EL ACABADO ESPEJO

Este trabajo explora las posibilidades del empleo de acabado espejo en los paneles composite de aluminio. La elección de acabado espejo no solo responde a su atractivo visual, sino también a su capacidad para añadir valor funcional y estético a los espacios construidos. Ofrece una estética elegante y moderna al crear un impacto único en el diseño arquitectónico, reflejando su entorno y creando una sensación de amplitud y luminosidad.

Su empleo en la arquitectura ha implicado nuevas formas de entender la integración del edificio en el espacio urbano. Para poder hablar de pieles reflectantes en edificios primero es importante conocer su origen en la arquitectura.

1.2.1. Historia del espejo como material en la arquitectura

Los primeros usos habituales del espejo en la arquitectura se encuentran en el Barroco, y aunque era normalmente destinado para revestimiento de interiores y elementos decorativos, desempeña un papel más allá, ya que posibilita una composición espacial específica. La transición directa del arte a la arquitectura abre nuevas oportunidades para la configuración del espacio.

En Francia, en el siglo XV se vuelven comunes los revestimientos de espejo en espacios destinados a eventos elegantes, como salas de baile, buscando intensificar la saturación de color y movimiento, creando una vibrante experiencia espacial. Las galerías, inicialmente pasillos hacia la capilla, evolucionan para convertirse en espacios de exposición valiosos por sí mismos. En Versalles, estas galerías adquieren un papel único, destacando la riqueza y la vanguardia artística de Francia, donde el espejo, dada su costosa producción, se convierte en un símbolo de lujo. Este uso del espejo para, en cierto modo, distorsionar el espacio, se extiende por toda Europa.

Ilustración 7. La Galería de los Espejos del Palacio de Versalles.



Fuente: "Archivos de la historia" de Ángel Viñas.

Ya en la arquitectura contemporánea, el uso del espejo se traslada al exterior. Los pabellones de las Exposiciones Universales se convierten en el vehículo idóneo para que los arquitectos experimenten. Así, una de las primeras arquitecturas que muestra el vidrio como elemento de construcción es el Crystal Palace diseñado por Paxton para la Exposición Universal de Londres en 1851, su intención era proporcionar a los visitantes una experiencia única al permitirles experimentar con la luz y el espacio en el interior del edificio, además de buscar el juego de los reflejos y transparencias en el vidrio.

Merece destacar su serie de obras conocidas como “los pabellones” del artista Dan Graham pionero en el estudio y uso del espejo y superficies reflectantes a partir de los años setenta. Estos pabellones son instalaciones arquitectónicas que incorporan vidrio transparente y espejos, creando estructuras que desdibujan las líneas entre el interior y el exterior. Al utilizar espejos, Graham juega con la percepción del espacio y la interacción del espectador con la obra. Los visitantes pueden ver su propio reflejo, así como el entorno que se refleja en los espejos, lo que crea una experiencia visual y espacial única. Estos pabellones se han convertido en ejemplos importantes de arte contemporáneo que fusiona la arquitectura y la experiencia visual.

Ilustración 8. Parque Urbano en la azotea de Dan Graham.



Fuente: Publicaciones E.T.S. Arquitectura (UPM). Foto: Bill Jacobson Studio, New York

Ilustración 9. “Two adjacent pavilions” (1978).



Fuente: Arqitasa

En la arquitectura contemporánea, se ha intensificado el acabado de espejo y el uso de vidrio reflectante que crea un efecto espejo en fachadas, permite ofrecer un entorno diferente, no solo la estética visual del propio edificio, sino también como elemento distorsionador de la calle, sobre todo se utiliza como estrategia de urbanismo cuando se construye enfrente a un edificio singular, como por ejemplo en barrios de Londres o de New York. Un ejemplo en Hudson Yards, Nueva York es “The Spiral” diseñado por Bjarke Ingels Group, aunque no tiene una fachada completamente de espejo, su revestimiento de vidrio reflectante crea un efecto espejo, especialmente cuando la luz incide en él.

Ilustración 10. “The Spiral” diseñado por Bjarke Ingels Group, 2023.



Fuente: Bjarke Ingels Group (BIG). Foto: Laurian Ghinitoiu

1.2.2. El acabado espejo. Ejemplos de arquitecturas.

El empleo de materiales con un acabado capaz de reflejar imágenes, como el vidrio, el espejo, o las superficies muy satinadas, permite cambiar continuamente el aspecto visual del lugar, que queda desdibujado. El entorno se distorsiona y el edificio se camufla en él, hasta prácticamente desaparecer. La imagen reflejada nunca es fija ni se repite porque cambian las condiciones de iluminación a lo largo del día e influye la posición relativa del observador. Las superficies espejadas suelen ser de dos tipos:

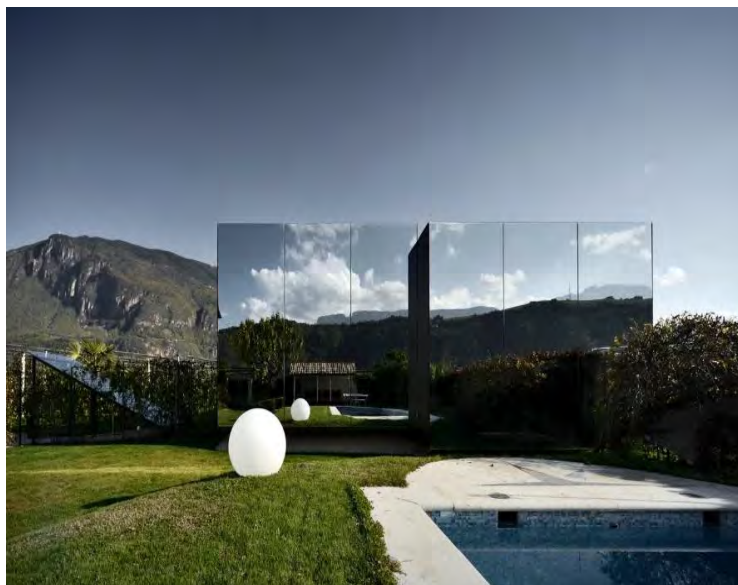
- El espejo tradicional que se obtiene a partir del plateado de un vidrio. Actualmente, el vidrio se ha sustituido por los metales pulidos porque su precio es más bajo y son, a nivel de construcción, más versátiles.
- Los metales pulidos. Este tipo de revestimiento es menos frágil que el vidrio y presenta menos espesor y mayor resistencia.

Por tanto, se tiende a la utilización de los metales pulidos, como los laminados acabados en aluminio, frente al vidrio que se usa más en interior que en exterior.

El revestimiento reflectante da una dimensión visual diferente a la arquitectura, permite distorsionar el espacio y diferenciar el entorno frente a otras arquitecturas más singulares. Se muestran a continuación algunos ejemplos de acabado en espejo de diferentes arquitecturas.

En la base de las montañas Dolomitas del Tirol del Sur, entre los manzanos, se encuentran las Mirror Houses, diseñadas por Peter Pichler:

Ilustración 11. Casas de espejos en Bolzano (Italia).



Fuente: Revista Architecture+Design. Foto: Oskar Da Riz

Edificio con Paneles composite de aluminio con acabado espejo en fachada por Dicom:

Ilustración 12. Edificio de Sitges (España).



Fuente: Alucobond & Design por 3 Composite.

Otra construcción con Paneles composite de aluminio con acabado espejo en el techo:

Ilustración 13. Frente Marítimo de Las Palmas de Gran Canaria (España).



Fuente: Romera y Ruiz Arquitectos.

1.3. PANELES COMPOSITE DE ALUMINIO EN FACHADA VENTILADA

1.3.1. Fachada ventilada: soporte y lienzo del edificio

La envolvente de un edificio representa la primera impresión que el usuario recibe sobre la obra arquitectónica, convirtiéndose en ocasiones en el icono distintivo del mismo. Desde el inicio del proyecto arquitectónico, desempeña un papel importante no solo por cumplir la función de protección frente a los elementos externos, actuando como barrera física y climática, que garantiza la seguridad, habitabilidad y funcionalidad, sino que también aporta la imagen del edificio, su identidad.

A lo largo de la historia, esta condición dual como soporte estructural y lienzo arquitectónico para la expresión creativa hacia el exterior ha sufrido multitud de transformaciones; no obstante, los cambios más notables han surgido como resultado de la evolución de las técnicas constructivas.

En la arquitectura contemporánea, la fachada ha tomado una nueva dirección, centrándose en mejorar la calidad del edificio. Desde esta perspectiva innovadora, ha sido un terreno de experimentación para nuevos sistemas constructivos y materiales, con el objetivo de lograr la sinergia entre la máxima eficiencia energética y el valor estético del edificio.

La fachada ventilada es un sistema constructivo de cerramiento exterior que se caracteriza por crear una cámara de aire ventilada entre el muro soporte y el revestimiento exterior del edificio que favorece el ahorro energético. La cámara interior es ventilada mediante la entrada y salida del aire exterior a través de las rejillas de ventilación situadas en el arranque y la coronación de la fachada.

Según el Manual Básico “*Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad.*” realizado en la Región de Murcia³¹, la fachada ventilada es considerada la más eficaz para el aislamiento del edificio, si se compara con los sistemas convencionales, gracias a colocación del aislamiento sobre la hoja interior minimizando los puentes térmicos, y por tanto, los problemas de condensación y mejorando el comportamiento térmico e higrométrico del edificio.

Cada elemento de la fachada ventilada tiene una función específica que, en conjunto, garantiza su correcto funcionamiento:

- a. El muro soporte u hoja interior es el cerramiento propiamente dicho de la fachada. Puede ser estructural o no estructural si soporta o no las cargas del edificio.
- b. Un aislamiento térmico opcional sobre la cara exterior del elemento soporte.

³¹Manual Básico de Fachadas Ventiladas y aplacados. Comunidad Autónoma de Murcia

- c. La subestructura portante a la que se fija el revestimiento al soporte y le transmite los esfuerzos que recibe.
- d. La cámara de aire, no estanca, que permite la ventilación y se sitúa entre el muro portante y el material de revestimiento.
- e. El material de revestimiento u hoja exterior que está formada por elementos aplacados de paneles o placas de diversos materiales, como puede ser de cerámica, piedra, paneles de vidrio, aluminio o materiales compuestos.

El revestimiento que se va a tratar para este trabajo es el panel composite de aluminio.

1.3.2. Antecedentes e inicios del Panel Composite de Aluminio (PCA)

A principios del siglo XX empieza a emplearse en Inglaterra un sistema de muro multicapa con cámara de aire para la fachada, la llamada “*cavity wall*” o pared hueca. Surgió como respuesta a las preocupaciones higienistas de la época, que enfatizaban la importancia de la salubridad a través de la ventilación y la aireación. Esta innovación proporciona beneficios adicionales, como el control de humedades y condensaciones, además de mejorar significativamente el aislamiento térmico.

Para el revestimiento exterior de la fachada empiezan a emplearse chapas metálicas, las cuales habían sido utilizadas únicamente para tejados, ya sea como una lámina única o como panel sándwich.

El constructor y diseñador francés Jean Prouvé, reconocido por su influencia en la arquitectura del siglo XX, revolucionó la construcción con el uso de acero y aluminio, favoreciendo materiales prefabricados para su ensamblaje en obra. A lo largo de su vida experimentó con la fachada multicapa, aportando soluciones innovadoras con acabado exterior metálico y utilizando aislamientos térmicos compactos.

Una de las primeras obras en la que se introducen paneles metálicos, en concreto paneles aislantes sándwich utilizados como cerramiento para la fachada, es la Casa del Pueblo (Clichy, Francia 1936-1939). En ella emplea dos tipos de cerramiento, muro cortina y paneles metálicos opacos, colocados de manera correspondiente al uso que delimitaban.

Así los paneles metálicos cubrían los núcleos de comunicación, las particiones móviles y las oficinas parcialmente. Por su manera de colocación mediante junta abierta y por la proporción que siguen sus lados, donde la altura es cuatro veces mayor a la anchura, produce una composición de líneas verticales. A estos paneles se le añade una peculiaridad, sufrían un abombamiento creado por un muelle colocado en el centro ya que no se podía asegurar la planicidad de la chapa.

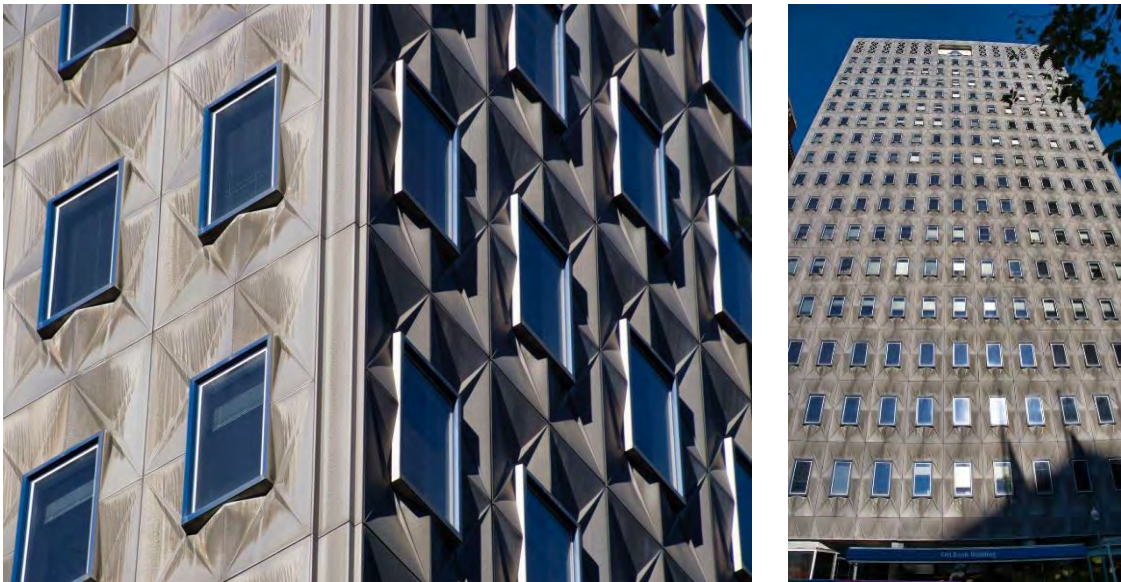
Ilustración 14. Casa del Pueblo, Clichy (Francia).



Fuente: Rubén Pavón Estevez.

Otro ejemplo donde se explora con las posibilidades del aluminio en la fachada es edificio “ALCOA”, realizado para la empresa Aluminium Company of America (ALCOA) por el estudio Harrison y Abramovitz entre 1950-1953 en Pittsburgh (Estados Unidos).

Ilustración 15. Edificio ALCOA, Pittsburgh (Estados Unidos).



Fuente: Nicolas Janberg.

La fachada de este edificio de 125 m de altura se compone de chapas sólidas de aluminio prefabricadas de altura igual a la de una planta. Las chapas se rigidizan mediante el modelado en punta de diamante rehundida, que además aporta un juego de sombras

sobre el edificio. Este sistema empleado permitía ahorrar costes y tiempo, debido principalmente a la facilidad de montaje de los paneles.

Los primeros paneles composite de aluminio surgen en esta misma época, con el fin de mejorar las prestaciones de los paneles metálicos empleados en fachada.

La compañía *3A Composites* (antes *Alcan Composites & Alusuisse*) inventó los paneles composite de aluminio en 1964, siendo la producción comercial de Alucobond en 1969. Tres años más tarde se patentó el producto. En 1991, dicha patente expiró.

Así, *3A Composites* desarrolló los paneles ALUCOBOND, estos lograban proporcionar un revestimiento más ligero, resistente e impermeable al agua, con una mayor planeidad, además de un espesor reducido. En 1969, se construye en Alemania la primera fachada con dichos paneles, se presentaban en enteros, sin procesos de fresado ni corte. Estos paneles, lacados en blanco, fueron fijados a una subestructura siguiendo el diseño de un muro cortina.

Con el tiempo, esta tecnología ha experimentado avances significativos, consolidándose como un componente esencial en la industria de la construcción, se mejoraron los procesos de fabricación y se introdujeron nuevos materiales, continuaron ganando popularidad en la construcción gracias a su ligereza, resistencia y capacidad para ofrecer soluciones estéticas y funcionales.

Hoy en día, los paneles composite se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones arquitectónicas y de construcción debido a su versatilidad, resistencia y capacidad para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Además, la continua innovación en la industria de la construcción ha llevado a la creación de paneles compuestos con propiedades mejoradas y adaptadas a los desafíos contemporáneos.

1.3.3. Definición y Características del Panel Composite de Aluminio

Un “Panel Composite de Aluminio” (PCA) es un material multicapa que consiste en dos hojas de aluminio, generalmente con recubrimiento de pintura, unidas mediante adhesivos específicos a un núcleo central de plástico rígido al que se le añaden o no cargas minerales. La capa exterior con aleación de aluminio que suele estar lacado con pintura que ofrezca una gran resistencia a la corrosión y al envejecimiento.

Su espesor total habitualmente es de 4 mm, correspondiendo 3 mm al núcleo y 0,5mm a cada chapa exterior, además admite longitudes de hasta 2000 mm de ancho.

Estas chapas pueden ser de diversos materiales como acero inoxidable, zinc, cobre o latón, pero las más utilizadas son de aluminio, tienen una alta durabilidad al exterior con muy buena protección al agua, resistencia a la corrosión y a los rayos UV, necesario para mantener la estética del material.

Para medir otras propiedades del aluminio el estudio mencionado anteriormente³² se realizó un análisis comparativo entre diferentes materiales empleados para recubrimientos de fachada y elaboró la siguiente tabla³³:

Tabla 3. Análisis Comparativo entre Materiales para el Recubrimiento de Fachadas.

Muestra	Masa / Superficie (g/cm ²)	Módulo de rotura (N/mm ²)	Expansión por humedad (mm/m)	Coef. Dilatación térmica (°C ⁻¹) * 10 ⁻⁶	Absorción de agua caravista (g/cm ²)
G. porcelánico	1,85	47 - 57	< 0,1	6,0	< 0,001
Mármol	5,32	10 - 11	< 0,1	4,1 - 4,6	0,006
Caliza	5,20	9 - 12	< 0,1	4,4 - 4,6	0,013
Granito	5,43	11 - 16	< 0,1	7,1 - 7,9	0,013
HPL	1,39	107	0,6 / 1,5	9,4 - 19,4	0,008
Fenolico	1,38	108	0,6 / 1,5	9,4 - 19,7	0,007
Aluminio	0,54	Deformable	< 0,1	23,1	0,001

Fuente: Manual Básico. Fachadas ventiladas. Comunidad Autónoma de Murcia.

Como se puede observar, el aluminio presenta la menor relación masa/superficie (0,54 g/cm²), lo que facilita su manipulación y montaje y reduce las cargas estructurales. Sus dimensiones debido a la humedad no varían, sin embargo, su coeficiente de dilatación térmica es el más alto de los materiales comparados, es por esto que a la hora de su colocación se prevén juntas de dilatación.

Dentro de las características de los PCA destacan:

- Gran planicidad
- Ligereza
- Posibilidad de realizar piezas de gran formato
- Diseño versátil que permite la adaptación a diversas formas y despieces gracias a que es posible su plegado, curvado, perforación y fresado
- Buena resistencia a agentes químicos atmosféricos, como el Dióxido de azufre (SO₂), o al salitre marítimo
- Protección contra incendios, únicamente los paneles que cuentan con núcleo A2 y FR por tener carga mineral, los cuales cumplen con la seguridad exigida en caso de incendios.

Brevemente se explican a continuación las características de los componentes de los PCA.

³²Manual Básico. Fachadas ventiladas y aplacados: Requisitos constructivos y estanqueidad elaborado con la CAM Murcia

³³ Tabla sobre "Análisis comparativo entre materiales para el recubrimiento de fachadas", pág. 39 del Manual Básico de la CAM Murcia.

○ Núcleo del PCA.

En la actualidad se trabaja principalmente con tres tipos de núcleo:

- Núcleo de polietileno de baja densidad (PE): es el primer núcleo que empezó a utilizarse, aunque es el más económico de los tres presenta una gran desventaja ya que no cuenta con propiedades ignífugas, al no resistir al fuego y tener un poder calorífico muy elevado (>35MJ/Kg) puede contribuir a su propagación. A pesar de esto, se sigue empleando para edificaciones en las que la evacuación en caso de incendio es rápida.
- Núcleo de polietileno con otros componentes de naturaleza mineral (FR): está formado por polímeros de baja densidad a los que se le añade carga mineral, con el fin de mejorar su comportamiento frente al fuego retardando la propagación en caso de incendio, su poder calorífico es significativamente inferior al núcleo PE (varía en torno 10-15MJ/Kg). Este núcleo es más rígido y seguro, pero a su vez, más pesado que el primero.
- Núcleo A2 (según la clasificación incluida en el Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencias frente al fuego³⁴): la composición es similar al núcleo FR pero con una carga mineral mucho mayor, por lo que se considera un material no combustible y sin contribución al fuego, su poder calorífico tiene un valor menor a 3MJ/Kg. Es, de nuevo, más rígido, seguro y pesado que los anteriores.

El empleo de un núcleo de polietileno con carga mineral aporta ligeramente más rigidez al tiempo que es menos deformable y disminuye su peso frente a una única chapa sólida. Además, no envejece por estar protegido por las chapas de aluminio.

○ Acabados

Los PCA ofrecen una gran cantidad de posibilidades de acabados, no solo en cuanto al color, brillo o imitación de textura de la chapa exterior, sino que también admite cambios de forma mediante los procesos correspondientes.

Los acabados sobre la chapa exterior de aluminio pueden ser de toda la paleta de colores sólidos, imitar materiales naturales como distintos tipos de madera o de piedra, o imitar texturas como el cemento o cerámica, diferentes metales, translúcidos o incluso que cambien según cómo incide la luz, así como acabado espejo.

Los procesos a los que se pueden someter para cambiar su forma pueden ser punzoado y troqueado, canteado, curvado, estampado y grabado, conformado 3D, fresado, remachado y atornillado, corte, taladro o plegado.

³⁴BOE nº 281 de 23/11/2013.

Las láminas de aluminio pueden ser recubiertas con diversos materiales. Se describen brevemente algunos de estos acabados.

a) Polifluoruro de Vinilideno o PVDF

El “Polifluoruro de Vinilideno”, conocido como PVDF o resina de flúor, es un polímero con gran durabilidad y resistencia en el exterior lo que hace que sea un material muy requerido en la construcción de fachadas y revestimientos exteriores. Como características principales se resaltan:

- Resistencia química: el carbono y flúor potencian en el PVDF su resistencia a una amplia variedad de sustancias químicas, incluidos ácidos, bases y solventes. No obstante, no es inmune a todos por lo que en función de su uso siempre se debe evaluar su compatibilidad.
- Estabilidad térmica: a diferencia de otros polímeros, el PVDF puede soportar temperaturas extremas sin perder sus propiedades mecánicas.
- Propiedades mecánicas: es conocido por su robustez, lo que lo hace idóneo para aplicaciones que requieren resistencia y durabilidad.

En cuanto a su uso e impacto en el medio ambiente, el PVDF aunque es un polímero fluorado, es menos perjudicial en comparación con otros polímeros similares, presentando además un potencial significativo para ser reciclado. Al final de su ciclo de vida útil, el PVDF puede ser reprocesado y utilizado en nuevas aplicaciones, reduciendo así el desperdicio y minimizando su huella ecológica.

Sin embargo, es un material con un coste relativamente alto en comparación con otros polímeros.

b) Polvo de Fluoropolímero (FEVE)

Los recubrimientos en polvo de fluoropolímero (FEVE) representan uno de los sistemas de mayor durabilidad exterior disponibles. También ofrecen una huella de sostenibilidad superior en comparación con las pinturas líquidas equivalentes.

Estas características hacen que se usen ampliamente en aplicaciones arquitectónicas exteriores, como por ejemplo edificios comerciales, residenciales que incluyen muro cortina, elementos de fachada, ventanas/pared de ventana, puertas, toldos y paneles.

c) Panel Composite de Aluminio con acabado espejo

Una lámina de aluminio con acabado de espejo es una lámina de este material que ha sido pulida para lograr una superficie reflectante similar a la de un espejo. Mediante técnicas de esmerilado y pulido se logra una superficie lisa y altamente reflectante. La

aparición de espejo de la hoja no solo tiene fines prácticos en arquitectura y en varias industrias, sino que también mejora el atractivo visual.

La aleación de lámina de aluminio con acabado de espejo se usa con fines decorativos, como en accesorios de iluminación, paneles reflectantes y aplicaciones arquitectónicas. La superficie reflectante de estas láminas agrega un toque de distinción y elegancia a los edificios, pero también tiene aplicaciones funcionales. Por ejemplo, es una buena opción para aplicaciones de energía solar. Cuando se utiliza como reflector en paneles solares, esta lámina maximiza la absorción de la luz solar, lo que aumenta la eficiencia general del sistema solar.

Ilustración 16. Lámina de aluminio con acabado de espejo.



Fuente: Euro Panel Product Company de Maharashtra (India)

En conclusión, las láminas de aluminio con acabado de espejo ofrecen una combinación de atractivo estético y ventajas funcionales, lo que las convierte en una opción frecuente en aplicaciones arquitectónicas.

1.3.4. Evaluación de sistemas de revestimiento fachada ventilada y PCA.

La correcta instalación y rendimiento de los PCA son críticos para garantizar que el sistema cumpla con los estándares de construcción y las normativas específicas. La evaluación técnica de los elementos de la fachada ventilada es esencial debido a su impacto directo en:

- La integridad estructural,
- El comportamiento térmico,
- La seguridad contra incendios y la durabilidad del edificio.

La correcta instalación y rendimiento de los PCA son críticos para garantizar que el sistema cumpla con los estándares de construcción y las normativas específicas. No existe una norma específica para paneles composite, pero sí documentos para evaluar su control y caracterización.

Un Documento de Evaluación Europea (DEE/EAD) es un documento que se emite para un producto de construcción por parte del Organismo de Evaluación Técnica Europeo (EOTA, por sus siglas en inglés). Este documento proporciona una evaluación técnica del rendimiento de un producto de construcción en relación con los requisitos esenciales de construcción establecidos en la normativa europea.

La emisión de un DEE se basa en la evaluación de las prestaciones del producto y permite a los fabricantes demostrar que su producto cumple con los requisitos esenciales de construcción. La idea central es facilitar la libre circulación de productos de construcción en el mercado europeo al establecer un enfoque armonizado para la evaluación de productos. Actualmente, para paneles composite se encuentra publicado el EAD 210046-00-1201 "*Thin metal composite sheet*".

Por otra parte, la evidencia de una evaluación técnica favorable se encuentra en el denominado "Documentos de Idoneidad Técnica" (DIT) que es un documento de carácter voluntario concedido por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC).

El IETcc-CSIC es la única entidad en España autorizada para otorgar el DIT, así como para confirmar otros DIT concedidos por Organismos Miembros de la Organización Europea para la Idoneidad Técnica (UEAtc).

Los materiales, sistemas o procedimientos constructivos que carecen de normativas reguladoras específicas y cumplen con ciertos criterios pueden ser evaluados para obtener un DIT que regulen sus características, prestaciones, empleo y puesta en obra, como es el caso del sistema de fachada ventilada con PCA. La validez de un DIT es de 5 años, en los cuales se realizan seguimientos anuales de fabricación.

Para que un sistema de revestimiento exterior con PCA tenga una concesión DIT debe tener un comportamiento positivo frente a exigencias de resistencia mecánica, seguridad contra incendios, salud y medio ambiente, seguridad de uso, protección acústica, eficiencia energética y sostenibilidad de recursos para el previsto. Es importante destacar que un DIT se otorga para un uso específico del material, y se evalúa continuamente mediante autocontrol de producción y asistencia técnica por parte del fabricante.

PARTE 2

PARTE 2. TRABAJO EXPERIMENTAL

A continuación, se expone el trabajo experimental realizado desde el inicio hasta la caracterización de paneles composite de aluminio con núcleo de RCD y acabado espejo.

Este trabajo se divide en las siguientes etapas:

1. Descripción de los materiales utilizados
2. Creación del núcleo con RCD
3. Adherencia del núcleo RCD a chapa de aluminio con cianoacrilato
4. Adherencia del núcleo RCD a chapa de aluminio con resina epoxi
5. Ensayo de tracción
6. Medida de dilatación

El resultado de este trabajo experimental conllevará una evaluación del potencial de expresividad arquitectónica del material obtenido y una valoración de sostenibilidad de la solución propuesta.

Solo una parte del trabajo, un ensayo de adherencia del núcleo RCD a la chapa de aluminio y los ensayos de tracción, han podido realizarse en un laboratorio, en concreto en el laboratorio DIT del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja en Madrid como inicialmente se había planeado.

Sin embargo, con el fin de mantener la integridad y precisión del estudio, las actividades experimentales fueron meticulosamente realizadas en un entorno controlado en mi domicilio. Los procedimientos que he seguido y los materiales y herramientas usadas han sido las apropiadas para asegurar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. A pesar de las limitaciones logísticas, se procuró mantener los estándares más altos en la ejecución de las actividades experimentales, garantizando así la robustez y calidad de los datos recopilados.

En los sucesivos apartados se expone, a través del trabajo experimental, que el valor no solo reside en los resultados finales, sino también en los procesos que se han llevado a su consecución. A través de pruebas, algunas de las cuales han sido fallidas y otras satisfactorias, el objetivo siempre ha sido contribuir al avance del conocimiento, utilizando la estética como un medio para el descubrimiento y la innovación en el ámbito constructivo.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Antes de comenzar con las etapas del trabajo experimental, se describen los materiales empleados en el trabajo experimental.

2.1.1. Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)

Las tres clases de residuos empleados para este trabajo proceden de la industria y de la construcción y demolición de edificios.

- Residuos cerámicos con tamaño de partícula ≤ 1 mm de diámetro.
- Residuos de hormigón con tamaño de partícula ≤ 1 mm de diámetro.
- Residuos mixtos de hormigón y cerámicos con tamaño de partícula ≤ 1 mm de diámetro.

Ilustración 17. RCD empleados



Fuente: Elaboración propia.

2.1.2. Cemento natural de rápido fraguado

Este cemento de fraguado rápido ha sido evaluado y verificado por el IETcc. Cumple con Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011 (Reglamento de Productos de Construcción).

a) Descripción técnica del producto:

Este cemento cumple con las especificaciones de la norma EN 197-1. Es un aglutinante hidráulico con características de fraguado rápido y aumento de resistencia. Las características particulares son las siguientes:

- la materia prima principal se extrae de una única veta geológica homogénea específica,

- se quema en un horno a $T < 1,300^{\circ}\text{C}$ para obtener cantidades bajas de aluminatos muy reactivos (pero no monofásicos de calcio) y un contenido de $\text{C}_2\text{S} > 45\%$,
- el tiempo de fraguado inicial está entre 1 y 4 minutos.

El cemento tiene un tiempo de fraguado muy corto, por lo que a veces puede ser necesario utilizar ácido cítrico como retardador. La composición química de este cemento es muy similar a la del cemento Portland y tiene un alto contenido de C_2S , belita, favorable para la durabilidad.

b) Especificación del uso previsto de acuerdo con el EAD aplicable:

Este cemento natural de rápido fraguado está destinado a ser utilizado para producir hormigones, morteros, lechadas y otras mezclas para la construcción y para la fabricación de productos de construcción.

c) Rendimiento del producto y referencias a los métodos utilizados para su evaluación:

Las pruebas de identificación y la evaluación para el uso previsto de este producto según los Requisitos Esenciales se llevaron a cabo cumpliendo con el Documento de Evaluación Europeo Nº 16-15-0008-03.01 para "Cemento de Fragar Rápido".

d) Características del cemento utilizado:

Resistencia temprana (EN 196-1, modificado, A1.2 EAD 16-15-0008-03.01 arena: 1350 ± 5 g, cemento: 675 ± 2 g y agua: 270 ± 1 g, $a/c=0,4$) a los 15 minutos: 3 MPa. El valor límite declarado es > 1 MPa.

Resistencia estándar (EN 196-1, mod. A1. EAD 16-15-0008-03.01 arena: 1350 ± 5 g, cemento: 675 ± 2 g y agua: 270 ± 1 g, $a/c=0,4$) a los 28 días: 38 MPa. El valor límite declarado es > 25 MPa.

Tiempo de fraguado inicial (EN 196-3, mod, A1.3 EAD 16-15-0008-03.01): 1 minuto (ácido cítrico al 0,4%). El valor declarado está entre 1-4 minutos.

Contracción (UNE 80115) a los 28 días: 0,2% (ShrM). El valor límite declarado a los 28 días es $\leq 0,5\%$.

Sonoridad (EN 196-3, mod A1.4 EAD 16-15-0008-03.01): 1 mm. El valor límite declarado es < 15 mm.

Pérdida por ignición (EN 196-2): 9%. El valor límite declarado es $\leq 14\%$.

Contenido de sulfato (EN 196-2). 2,9 %. El valor límite declarado es $\leq 4\%$

Contenido de cloruro (EN 196-2). 0,03 %. El valor límite declarado es $\leq 0,1\%$

Contenido de silicatos de calcio (EN 197-1): 50%. El valor declarado está entre 50-60%.

Residuo insoluble (EN 196-2). 5%. El valor límite declarado es $\leq 6\%$.

Finura (Blaine) (EN 196-6). 5500 cm² /g. El valor límite declarado es ≥ 5000 cm² /g.

ER. 3 Higiene, salud y medio ambiente

Cromo hexavalente soluble en agua (EN 162-2): < 2 ppm. El valor límite declarado es < 2 ppm.

En la Tabla siguiente se comparan las características de este cemento natural frente a las que presenta el cemento Portland, el habitualmente usado en la construcción:

Tabla 4. Características del Cemento Natural vs el Cemento Portland

CEMENTO NATURAL	CEMENTO PORTLAND
· Piedra caliza arcillosa de origen natural.	· Mezcla artificial de arcilla y caliza.
· Arcilla aprox. 22-35%	· Arcilla aprox. 20%
· T ^a calcinación: 800° - 1200°C	· T ^a calcinación: 1400° - 1650°C
· Mineral principal C2S (Belita)	· Mineral principal C3S (Alita)
· Definido y clasificado según UNE 80309-2006	· Definido y clasificado según UNE-EN-197-1

Fuente: Revista Ingeniería Civil.

El proceso de fabricación del cemento Portland, es más energéticamente intensivo debido a las altas temperaturas requeridas lo que supone un alto impacto en el medioambiente.

2.1.3. Chapas de aluminio con acabado espejo

Las chapas de aluminio utilizadas en esta fase experimental han sido aportadas por la empresa Sistema Técnicos del Accesorio y Componentes S.L (STAC) siendo STACBOND su División dedicada a paneles composite. Los paneles con acabado espejo “Natural mirror” STB-M01 son de la “Special Collection” de la empresa, presentan una lámina exterior de aleación de aluminio 5005 de 0,5mm de espesor.

Ilustración 18. Características del Panel Composite con acabado espejo.

CARACTERÍSTICAS PINTURA			
	VALOR	UD	NORMA
Espesor del recubrimiento exterior PVDF 70/30-HDPE*	25-40	μm	EN 13523
Espesor del recubrimiento interior Primer	5-10	μm	
Brillo (medido angulo 60°)	30	GU	EN 13523 - 2 / ISO 2813
Dureza de Lápiz	HB-F		EN 13523 - 4
CARACTERÍSTICAS DEL PANEL			
	VALOR	UD	NORMA
Temperatura de utilización	- 40 /+ 80	°C	
Dilatación térmica Δ100°C	2.215	mm/m	
Transmitancia Térmica [U]	5.88	W/m ² K	EN 12524
CARACTERÍSTICAS DE LA PIEL DE ALUMINIO LACADO			
	VALOR	UD	NORMA
Aleación ⁽¹⁾	5005 / 3105 /3005		EN 573-3
Módulo de elasticidad [E]	70000		
Tensión a límite elástico (Rp 0.2)	≥ 80		EN 485 - 2
Tensión a rotura (Rm)	125 ≤ Rm ≤240		
Elongación (A50)	≥ 4		
Resistencia al Impacto	4 Julios / GTO		EN 13523 - 5/6
Resistencia química	5% HCl sin cambios		ISO 2812 - MÉTODO 3
Densidad	2700	kg/m ³	

¹ Acabados Mirror Liga 1050

Fuente: STACBOND.

2.2. PROCESO DE CREACIÓN DEL NÚCLEO CON RCD

En esta primera parte de trabajo experimental, se ha calculado el tiempo de fraguado del cemento natural, la cantidad de residuo, cemento y agua necesaria para cada probeta, y se ha realizado los encofrados y se han obtenido los núcleos.

2.2.1. Cálculo del tiempo de fraguado del cemento natural

El objetivo de calcular el tiempo de fraguado del cemento es para conocer el margen de tiempo que dispongo para la realización de las probetas, antes de que se seque y no sea trabajable.

La relación recomendable de agua/cemento para que el cemento pueda adquirir las mejores características es A/C=0,5, es decir, el doble de cemento que de agua. Para este caso se han empleado 100g de agua y 200g de cemento y obtuve 50 segundos.

2.2.2. Cálculo de la mezcla necesaria para cada probeta

Primero se calcula el volumen contenido en cada probeta. Posteriormente, conociendo ese volumen, la altura que debe alcanzar la mezcla para rellenar la misma cantidad de volumen y, después las relaciones entre los 3 elementos para que la mezcla sea la apropiada.

El volumen de cada probeta se realiza con un cálculo sencillo, multiplicando largo por ancho por espesor.

Las probetas que se van a realizar son secciones cuadradas de 10 x 10 x 0,4 cm.

Por lo tanto, el volumen de cada muestra es: $10 \cdot 10 \cdot 0,4 = 40\text{cm}^3$.

El espesor de 4 mm se ha establecido por ser el mismo que el de los paneles composite de aluminio normalizados y el largo y ancho para poder realizar de una manera correcta los ensayos de tracción posteriores.

Las relaciones entre los 3 elementos:

Se ponen 2 partes de RCD por cada parte de cemento por ser el valor más estándar según el ETE del cemento seleccionado. Esta proporción sería para cada molde a rellenar, ya que fragua tan rápido que no es viable preparar una amasada de mayor cuantía porque fraguaría antes de verterla en el molde.

La relación que se estableció al principio para medir el fraguado de cemento, A/C=0,5, se ha determinado que no es suficiente para cada muestra, puesto que, al añadir la cantidad de residuos a la mezcla se precisa de mayor cantidad de agua que permita mezclar de manera homogénea los ingredientes.

Se ha comprobado que:

- Una cantidad insuficiente de agua provoca: un aumento de la porosidad de la mezcla, afectando a la durabilidad y resistencia a la penetración de agentes externos, retracción excesiva que puede dar lugar a grietas y fisuras, dificultad para correcta compactación.
- Una cantidad excesiva de agua provoca: una difícil manipulación y vertido, dificulta la correcta compactación y distribución de los materiales en la mezcla, lo que afecta la homogeneidad y la calidad de la muestra.

Tras varias pruebas se ha determinado que la cantidad necesaria para que los componentes funcionen de la manera más correcta posible es:

- Probeta de RCD hormigón, cemento natural y agua: 60gr, 30gr, 30gr, respectivamente.
- Probeta de RCD cerámicos, cemento natural y agua: 60gr, 30gr, 35gr, respectivamente.
- Probeta de RCD mixto (cerámicos + hormigón), cemento natural y agua: 60gr, 30gr, 30gr, respectivamente.

Con estas cantidades se asegura que no solo la mezcla se reparte por toda la probeta, sino que se tiene en cuenta la cantidad que se desperdicia en el recipiente, ya que al tener que trabajar con pocos segundos de margen hay parte que se seca antes de verse.

Al realizar las pruebas con los RCD cerámicos y empleando la misma cantidad de agua que para los RCD hormigón se observa que los ingredientes de la mezcla no llegan a distribuirse de manera homogénea, ya que los residuos cerámicos absorben el agua más rápido.

Es por eso por lo que se ha empleado mayor cantidad de agua para la realización de las muestras de RCD cerámicos.

2.2.3. Preparación de las probetas

Para la obtención de los núcleos con los RCD se ha empleado el método de encapsulado de residuos. Para ello, primero es necesario realizar un encofrado que garantice una correcta contención de los residuos y una correcta extracción de la muestra.

Para la elaboración de las probetas de dimensiones 10x10x0,4 cm, se ha implementado el método de encapsulado de residuos. Este enfoque me ha permitido contener de manera efectiva residuos de construcción y demolición junto con cemento natural en probetas delgadas. La utilización de este método ha resultado fundamental para la preparación de las muestras.

Método de encapsulado de residuos

El proceso de encapsulado permite reutilizar dichos residuos mezclándolos con las cantidades específicas de cemento y agua, garantizando una distribución homogénea. Este método ha posibilitado la caracterización de un núcleo reciclado para paneles composite de aluminio.

Para la realización de este método se han realizado dos encofrados, uno fijo y otro desmontable, ya que el primer encofrado resultó ineficiente para la obtención de núcleos con RCD.

- **Fabricación del primer encofrado para obtención del núcleo RCD. Encofrado fijo.**

Fila de 3 probetas de dimensiones 10 x 10 x 0,4 cm.

- Cuerpo principal plano de conglomerado de madera para la base.
- Listones de madera de balsa de 0,4 x 0,4 cm para conformar los marcos laterales.
- Papel siliconado para facilitar el desencofrado.

Ilustración 19. Encofrado Fijo.



Fuente: Elaboración propia.

Se ha utilizado Super Glue Loctite y grapas para el fijado de los listones de madera de balsa al cuerpo principal plano de conglomerado de madera.

Las probetas obtenidas con este encofrado resultaron fallidas debido, principalmente a dos causas, a la difícil extracción de las muestras ya que el papel siliconado puede llegar a romperse al tirar de él y al ser poco rígido provocaba roturas en el momento del desencofrado; y la segunda causa es la falta de planicidad en su cara inferior por el desencofrante empleado.

- **Segundo encofrado para obtención del núcleo RCD. Encofrado móvil/desmontable**

Ilustración 20. Encofrado móvil/desmontable.



Fuente: Elaboración propia.

Para solucionar los problemas derivados del primer encofrado se procedió a conformar un encofrado nuevo que permitiese extraer las muestras con facilidad, este encofrado es desmontable.

Como base se ha empleado cartón madera rígido, permite tener una superficie lisa y plana, y a la vez, al ser ligero permite que se pueda mover con facilidad para trabajar mejor.

Encima de este se coloca una lámina de acetato de rigidez media de calibre 0,3mm de 10cm de ancho y de longitud mayor a la de la probeta para facilitar su extracción.

Listones móviles: En los cuatro laterales se sitúan 4 listones de madera de balsa de sección 0,4x0,4cm formando un marco interior cuadrado de 10x10cm, pegados a la base con pegamento de barra, con la intención de que se puedan despegar de con facilidad pero que a la vez se peguen lo suficiente para que no se muevan o deslicen al verter la mezcla y para facilitar la limpieza del encofrado.

Listones fijos: En los laterales izquierdo y derecho se colocan en los extremos exteriores dos listones de madera de balsa con la misma sección cuadrada 0,4x0,4cm, pegados con SuperGlue para fijarlos de manera permanente, con esto se asegura el encofrado.

Las probetas realizadas con este encofrado resultaron satisfactorias en un 55% de los casos, esto se debe a:

- Desencofrado antes de tiempo, no se dejó secar el suficiente tiempo
- Problemas de oquedades que facilitan la aparición de grietas
- Mala distribución de la mezcla en el encofrado, provocado por secado de la mezcla antes de verterla

Pasos para realización de núcleos RCD:

1. Mezcla de componentes.
2. Amasar de manera homogénea.
3. Vertido de la mezcla.
4. Compactación.
5. Fraguado.
6. Desencofrado.
7. Limpieza del encofrado.

1. Mezcla de componentes: con una balanza de precisión que permite medir gramos y miligramos se calcula la cantidad de agua necesaria (30g en el caso de probetas de RCD hormigón y mixto y 35g en las de RCD cerámico) en el recipiente indicado, en otro recipiente se mide la cantidad de 60g de RCD (hormigón, cerámico o mixto en cada caso), en el mismo recipiente se incorpora la cantidad de 30g de cemento natural.

Primero se mezcla el RCD con el cemento natural hasta que el polvo tenga un aspecto homogéneo, para que posteriormente, al mezclarlo con agua se asegure una correcta distribución de los componentes.

2. Amasado. A partir del momento en que se mezclan los materiales secos con el agua se dispone de 10 segundos aproximadamente para mezclar los componentes de manera homogénea antes de que se empiece a secar.

3. Vertido: Para lograr una distribución uniforme de la mezcla sobre toda la superficie de la probeta, es crucial que la consistencia de la misma sea ligeramente líquida durante el vertido.

4. Compactación: para asegurar que la mezcla se ajusta a las dimensiones de la probeta se compacta presionando en la parte superior y de manera homogénea con una plancha metálica de superficie plana, se coloca entre medias una lámina de acetato para evitar que parte de la mezcla se quede en la superficie de la plancha. Se debe presionar al menos 90 segundos para que la mezcla adquiera la forma deseada.

5. Fraguado: para que endurezca y se consolide la mezcla se deja secar un mínimo de 1h y media, a partir de esa hora se puede proceder al desencofrado.











6. Desencofrado: se retira el acetato superior y se eliminan las rebabas, el sobrante de material de los costados, y se procede a desmontar cuidadosamente el encofrado, primero los listones de los laterales superior e inferior, después los listones móviles de los laterales izquierdo y derecho. De esta manera se puede separar fácilmente la muestra del marco. La probeta no ha llegado a secarse por completo por lo que su manipulación sigue siendo meticulosa.











7. Limpieza: como son encofrados reutilizables se deben limpiar para poder generar nuevas probetas.

A continuación, se muestra una tabla con los datos e imágenes recogidos de la realización de los núcleos. Las primeras 6 pruebas se realizaron con el primer encofrado fijo, las restantes se realizaron con los encofrados desmontables.

Tabla 5. Probetas Realizadas.

Nomenclatura	Cantidad de RCD	Cantidad de cemento	Cantidad de agua	Resultado	Nomenclatura final	Imagen
$C_{(1)}$ -60-30-15	60	30	15	FALLIDO	-	
$C_{(2)}$ -60-30-30			30	FALLIDO	-	
$C_{(3)}$ -60-30-45			45	FALLIDO	-	
$H_{(1)}$ -60-30-15			15	FALLIDO	-	
$H_{(2)}$ -60-30-30			30	FALLIDO	-	
$H_{(3)}$ -60-30-45			45	FALLIDO	-	
$H_{(4)}$ -60-30-25			25	FALLIDO	-	
$H_{(5)}$ -60-30-30			30	SATISFACTORIO	HA30(1)	
$H_{(6)}$ -60-30-30			30	FALLIDO	-	

$H_{(7)}-60-30-30$	60	30	30	FALLIDO	-	
$H_{(8)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	HA30(2)	
$H_{(9)}-60-30-30$			30	FALLIDO	-	
$H_{(10)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	HA30(3)	
$M_{(1)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	MA30(1)	
$C_{(4)}-60-30-30$			30	FALLIDO	-	
$M_{(2)}-60-30-40$			40	FALLIDO	-	
$M_{(3)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	MA30(2)	
$C_{(5)}-60-30-35$			35	SATISFACTORIO	AA30(1)	
$C_{(6)}-60-30-40$			40	FALLIDO	-	

$C_{(7)}-60-30-35$	60	30	35	SATISFACTORIO	AA ₃₀ (2)	
$M_{(4)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	MA ₃₀ (3)	
$M_{(5)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	MA ₃₀ (4)	
$M_{(6)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	MA ₃₀ (5)	
$H_{(11)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	HA ₃₀ (4)	
$C_{(8)}-60-30-35$			35	SATISFACTORIO	AA ₃₀ (3)	
$M_{(7)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	MA ₃₀ (6)	
$C_{(9)}-60-30-35$			35	SATISFACTORIO	AA ₃₀ (4)	
$H_{(12)}-60-30-30$			30	SATISFACTORIO	HA ₃₀ (5)	
$C_{(10)}-60-30-35$			35	SATISFACTORIO	AA ₃₀ (5)	

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de resultados de las pruebas:

Un total de $10+12+7=29$ pruebas de las que han salido $5+5+6=16$ probetas satisfactorias. Se obtuvo un 45% de error, de probetas desechadas.

En el primer encofrado, el fijo, se obtuvo un 100% de probetas fallidas.

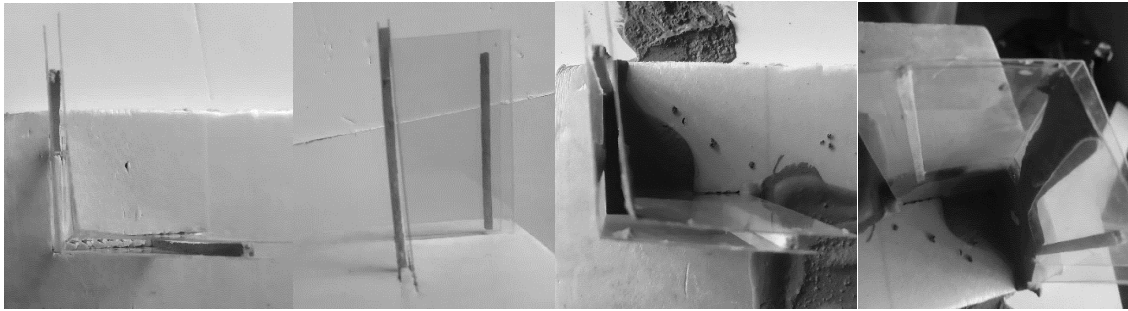
En el segundo encofrado, el móvil, se obtuvo un 70% de probetas satisfactorias.

Probeta en esquina a 90°:

Para abordar el revestimiento en esquinas de fachadas ventiladas con núcleos RCD, se llevaron a cabo diversas pruebas utilizando encofrados diseñados para encapsular residuos formando un ángulo de 90°. El proceso para crear el núcleo implica la construcción de un encofrado vertical, en contraposición al encofrado horizontal utilizado para las probetas planas, permitiendo verter fácilmente la mezcla de RCD, cemento y agua correspondiente.

El primer encofrado, compuesto por láminas de acetato con la forma de esquina a 90° y listones de madera de balsa, resultó ineficaz para contener la mezcla:

Ilustración 21. Primer encofrado esquina 90°.



Fuente: Elaboración propia.

El segundo encofrado resultó satisfactorio, aunque las probetas resultantes fueron frágiles y propensas a romperse. Se demostró que es posible conformar un núcleo RCD en esquina, aunque con limitaciones en la resistencia.

Este encofrado se construyó utilizando cartón pluma para lograr la forma deseada y se recubrió con acetato para prevenir la adhesión de la mezcla al cartón pluma:

Ilustración 22. Segundo encofrado esquina 90°.



Fuente: Elaboración propia.

Además de cumplir una función práctica en el cerramiento, esta solución también puede brindar soluciones estéticas innovadoras, generando efectos visuales únicos, especialmente en esquinas interiores que pueden dar lugar a composiciones visuales caleidoscópicas:

Ilustración 23. Composiciones visuales con espejo en esquina.



Fuente: Elaboración propia.

2.3. ADHESIÓN CON CIANOACRILATO

Una vez que los núcleos han endurecido completamente se procede a unirlos con las láminas de aluminio con acabado espejo. Antes de adherirlas todas es necesario realizar una prueba de verificación de adherencia.

2.3.1. Características del adhesivo utilizado.

El primer adhesivo con el que se probó es un pegamento Super Glue instantáneo que forma uniones fuertes sobre distintos materiales, en concreto y en este caso permite uniones sobre metal, cemento, cerámica y hormigón.

Características del adhesivo utilizado según la marca comercial (Loctite):

- Composición: Cianocrilato de etilo
- Color: Transparente
- Densidad: 1.1 g/mL a 20°C
- Viscosidad: 50-120 mPa·s
- Resistencia final (ISO 4587): 10-20 N/mm² (La resistencia final varía en función de la naturaleza del sustrato)
- Cumple la norma EN204-D3 de resistencia al agua
- Resiste temperaturas entre -50°C hasta picos de exposiciones de 120°C.
- Resiste los golpes.
- Tiempo de endurecimiento: 30-60 segundos
- Máxima resistencia de 12 a 24 horas

2.3.2. Método de trabajo. Fases.

Pasos seguidos:

1. Matriz 1x1 cm: la cantidad recomendable para asegurar una adherencia correcta es de una gota cada 1cm, para ello se dibuja una matriz de 1x1 cm sobre ambas superficies de la probeta.
2. Limpiar las superficies: las superficies de aplicación del adhesivo, tanto de las chapas de aluminio como del núcleo, deben estar limpias, esto se realiza con un pincel.
3. Aplicación del pegamento sobre cada punto de la matriz.
4. Unión de la chapa de aluminio con el núcleo y se ejerce una presión uniforme sobre toda la chapa durante 30-60 segundos para fijar ambas partes.
5. Endurecimiento: se debe dejar actuar aproximadamente 24 horas para que el adhesivo alcance su resistencia final.

Ilustración 24. Núcleo RCD.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Resultados del trabajo.

Se realizaron dos pruebas con este adhesivo, una con núcleo RCD de hormigón y otra con núcleo RCD cerámico, y en ambos casos se obtuvieron resultados no satisfactorios. Se dejaron 24h y sin aplicar mucha fuerza se pudo desprender con facilidad la chapa de aluminio del núcleo RCD. La rotura se produjo por una parte de manera cohesiva y por otra adhesiva, es decir, en algunas zonas la separación se produjo en el núcleo y en otras zonas en el adhesivo.

Ilustración 25. Resultado de la prueba.



Fuente: Elaboración propia.

2.4. ADHESIÓN CON EPOXI

El segundo adhesivo con el que se ha probado es la resina epoxi, un tipo de adhesivo estándar extrafuerte de Araldite Ceys (componente A) que se utiliza con un agente endurecedor (componente B) para crear una estructura tridimensional resistente y duradera. Esta resina epoxi empleada tiene unas propiedades de adherencia fuerte, resistencia química, durabilidad y versatilidad.

- Adhesivo cola (componente A)
- Endurecedor (componente B)

2.4.1. Características del adhesivo utilizado

Las características del adhesivo utilizado, una vez se han mezclado los dos componentes, según la marca comercial (Araldite) son las siguientes:

- Resiste temperaturas desde -60 a 65°C
- Soporta tracciones de hasta 350 Kg/cm²
- Resiste la mayoría de disolventes orgánicos
- Resiste golpes y vibraciones
- Capacidad de relleno
- No contrae
- Tiempo de endurecimiento: 6 horas
- Máxima resistencia de 12 a 72 horas

Para lograr una aplicación correcta, los componentes se mezclan en unas cantidades concretas: 100g de resina epoxi se mezclan con 80 g de endurecedor y reaccionan dejando un tiempo útil de 1 hora para su aplicación.

2.4.2. Método de trabajo. Fases.

Pasos seguidos:

1. Limpiar las superficies: las superficies de aplicación del adhesivo, tanto de las chapas de aluminio como del núcleo, deben estar limpias, esto se realiza con un compresor de aire.
2. Mezcla de componentes: para este caso se ha mezclado aproximadamente 45 g de resina epoxi con 35 g de endurecedor. Se deben mezclar hasta formar una pasta uniforme.

3. Aplicación del adhesivo: sobre ambas superficies de los núcleos se aplica una fina capa de adhesivo con palas de metal que aseguran que se reparte de manera uniforme por toda la superficie.
4. Unión de la chapa de aluminio con el núcleo y encintado: para que no se creen oquedades entre la chapa y el núcleo se ejerce presión sobre las superficies y se encintan con cinta de carroceros.
5. Máxima resistencia: se debe dejar actuar aproximadamente 24 horas para que el adhesivo alcance su resistencia final.

Se ha realizado este proceso sobre 9 núcleos, 3 núcleos RCD de hormigón, 3 núcleos RCD cerámicos y 3 núcleos RCD mixto.

Ilustración 26. Imágenes de las fases del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Resultados del trabajo.

La elección de este adhesivo ha venido motivada por su alto grado de adherencia, tras los resultados fallidos con el adhesivo tipo Loctite descritos en el apartado anterior. Por tanto, los resultados obtenidos con este adhesivo son satisfactorios y habilitan continuar con el proceso experimental siguiente.

2.5. ENSAYO A TRACCIÓN

Este ensayo se ha realizado de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 1607:1997 Resistencia a la tracción perpendicular a las caras 100x100mm, y la velocidad es de 10 mm/min. Asimismo, se ha llevado a cabo bajo mi supervisión en el laboratorio del Instituto Eduardo Torroja.

El ensayo a tracción se ha realizado para evaluar la adherencia de las chapas de aluminio a los núcleos RCD de los tres tipos. Medir la resistencia de adherencia y comprobar si la separación se produce por el adhesivo o por el núcleo.

2.5.1. Método de trabajo del Ensayo: Fases

Previo al ensayo, se realiza una preparación de las probetas en las que se unen a los sufrideros metálicos con el mismo adhesivo epoxi utilizado para pegar las chapas de aluminio a los núcleos RCD. Tienen una medida de sección cuadrada de 10x10cm

Pasos seguidos para la preparación previa al ensayo:

1. Descintado y limpieza de las probetas: tras dejar 24h endurecer el adhesivo se procede a quitar las cintas y eliminar las rebabas producidas y con el compresor de aire se quitan las partículas de polvo que pueda haber.
2. Mezcla de componentes: para este caso se ha mezclado aproximadamente 45 g de resina epoxi con 35 g de endurecedor. Se deben mezclar hasta formar una pasta uniforme.
3. Aplicación del adhesivo: sobre ambas superficies de los sufrideros metálicos se aplica una fina capa de adhesivo con palas de metal que aseguran que se reparte de manera uniforme por toda la superficie.
4. Unión de las sufrideras con las probetas y encintado: para que no se creen oquedades entre los materiales se ejerce presión sobre las superficies y se encintan con cinta de carroceros.
5. Máxima resistencia: se debe dejar actuar aproximadamente 24 horas para que el adhesivo alcance su resistencia final.

6. Pasadas las 24h se procede a descartar y limpiar las superficies, cualquier rebaba puede ocasionar variaciones en el resultado de los ensayos.

Ilustración 27. Imágenes de la fase previa del ensayo.



Fuente: Elaboración propia.

Tras la preparación de las sufrideras se procede al ensayo en cuestión. A continuación, se muestran las imágenes en el laboratorio mientras se realiza el ensayo a tracción en las instalaciones del referido laboratorio.

Ilustración 28. Imágenes del ensayo en el Laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

2.5.2. Resultados del trabajo

En primer lugar, se evalúan las probetas de RCD mixto, después de RCD hormigón y, por último, de RCD cerámico. Los tipos de fallo que pueden ocurrir sobre los paneles son cuatro:

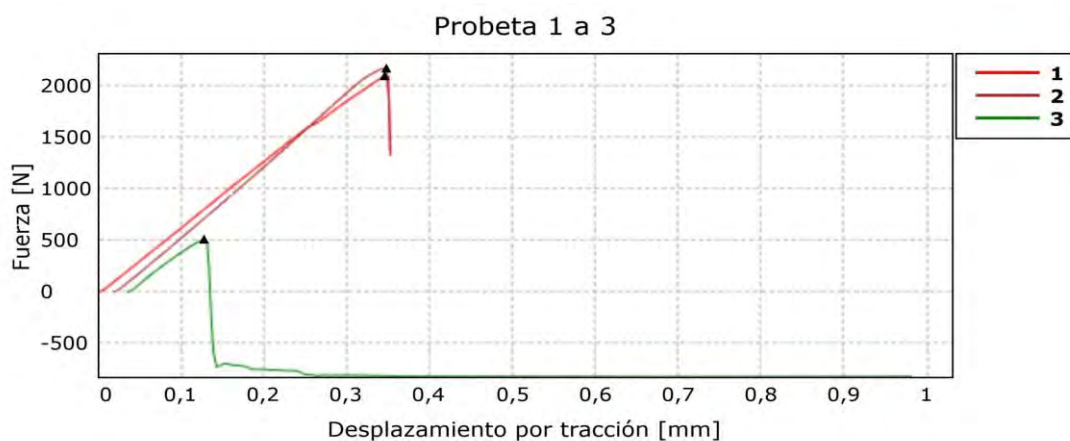
- Fallo cohesivo: ocurre cuando la rotura se produce dentro del adhesivo, indicando que la fuerza aplicada fue suficiente para romper las uniones moleculares internas

del adhesivo. Implica que la fuerza de adhesión del adhesivo es mayor que la fuerza interna del propio adhesivo.

- Fallo adhesivo: ocurre cuando la rotura se produce en la interfaz entre el adhesivo y el sustrato, indicando que la adhesión entre el adhesivo y el material es más débil que la cohesión interna del adhesivo.
- Fallo intermedio: combina características del fallo cohesivo y adhesivo, indicando que la rotura involucra tanto la interfaz adhesiva como el propio adhesivo.
- Fallo de sustrato: ocurre cuando la rotura se produce dentro del propio material, implica que la unión adhesiva fue lo suficientemente fuerte como para superar la resistencia interna del sustrato.

Los datos obtenidos para las probetas de RCD mixto son:

Tabla 6. Resultados de las Probetas de RCD mixto.



Gráfica fuerza-deformación de RCD mixto

	Fuerza al Máximo Carga [N]	Desplazamiento por tracción al Máximo Carga [mm]
$M_{A30(1)}$	2096,23	0,35
$M_{A30(2)}$	2164,05	0,33
$M_{A30(3)}$	502,96	0,09
Promedio	1587,75	0,26
Desviación estándar	940,07	0,14
Media + 1 DE	2527,81	0,40
Media - 1 DE	647,68	0,11

Fuente: Elaboración propia.

Donde,

Fuerza al Máximo Carga: indica la máxima fuerza aplicada a la probeta antes de que se produzca la rotura.

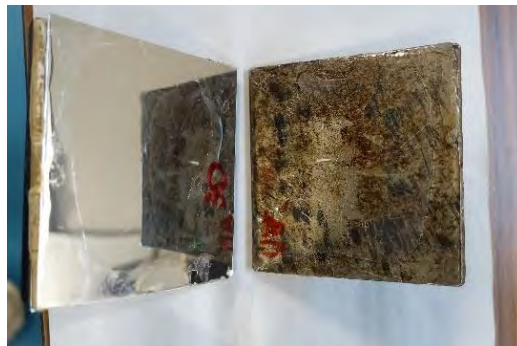
Desplazamiento por tracción al Máximo Carga: indica el aumento de la distancia vertical entre las sufrideras, en el momento exacto en que la carga aplicada alcanzó su valor máximo y se produce la rotura, durante la prueba de tracción.

Desviación estándar: indica la cantidad de dispersión o variabilidad del conjunto de datos.

Ilustración 29. *Imágenes del ensayo en el Laboratorio*



$M_{A30(1)}$: Fallo intermedio en un 70% adhesivo y un 30% cohesivo.



$M_{A30(2)}$: Fallo intermedio en un 80% adhesivo y un 20% cohesivo.

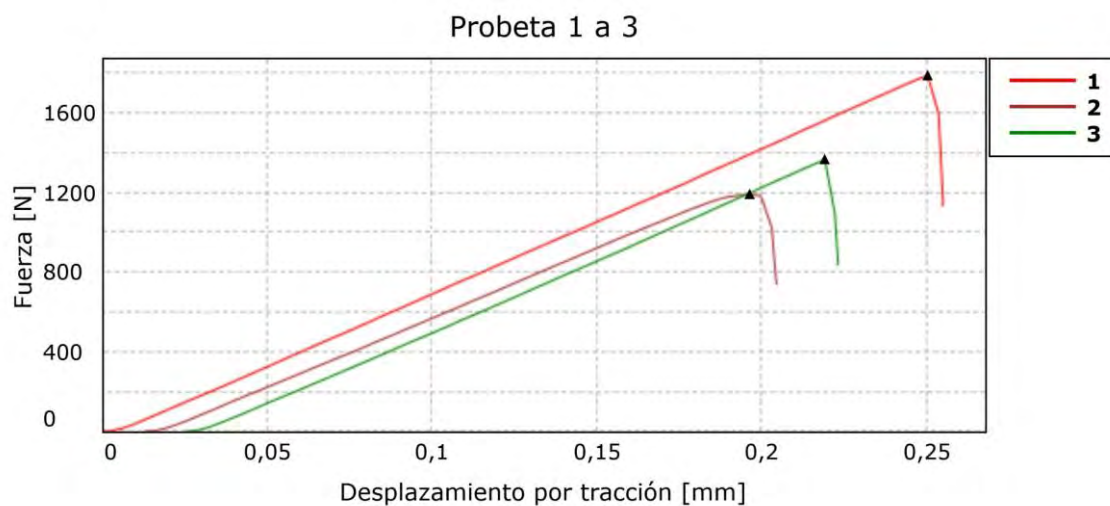


$M_{A30(3)}$:Fallo de sustrato.

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos para las probetas de RCD hormigón son:

Tabla 7. Resultados de las Probetas de RCD hormigón.



Gráfica fuerza-deformación de RCD hormigón

	Fuerza al Máximo Carga [N]	Desplazamiento por tracción al Máximo Carga [mm]
$H_{A30(1)}$	1787,78	0,25
$H_{A30(2)}$	1188,70	0,18
$H_{A30(3)}$	1363,81	0,19
Promedio	1446,76	0,21
Desviación estándar	308,03	0,04
Media + 1 DE	1754,79	0,25
Media - 1 DE	1138,73	0,17

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 30. Imágenes del ensayo en el Laboratorio



$H_{A30(1)}$:Fallo de sustrato.



$H_{A30(2)}$:Fallo de sustrato.

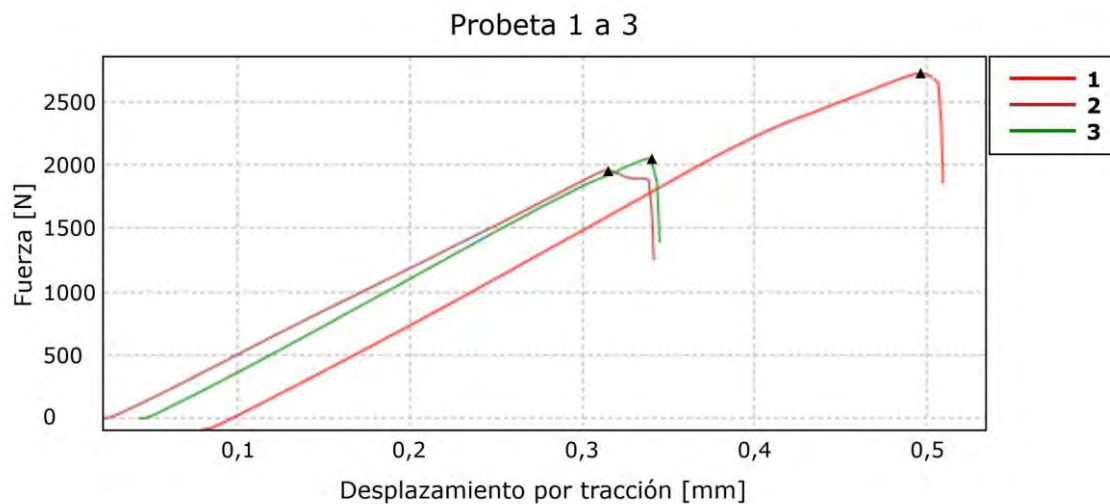


$H_{A30(3)}$:Fallo de sustrato. .

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos para las probetas de RCD cerámico son:

Tabla 8. Resultados de las Probetas de RCD cerámico.



Gráfica fuerza-deformación de RCD cerámicos

	Fuerza al Máximo Carga [N]	Desplazamiento por tracción al Máximo Carga [mm]
$C_{A30(1)}$	2720,24	0,50
$C_{A30(2)}$	2954,54	0,29
$C_{A30(3)}$	2050,23	0,30
Promedio	2241,67	0,36
Desviación estándar	417,21	0,12
Media + 1 DE	2658,88	0,48
Media - 1 DE	1824,46	0,25

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 31. Imágenes con los paneles resultantes del ensayo.





$C_{A30(1)}$: Fallo intermedio en un 70% adhesivo y un 30% cohesivo.



$C_{A30(2)}$: Fallo de sustrato.



$C_{A30(3)}$: Fallo intermedio en un 60% adhesivo y un 40% cohesivo.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se realiza una comparación entre la resistencia a tracción promedio de los tres tipos de probetas y la resistencia a tracción de un panel comercial. La resistencia a tracción representa la carga máxima que un material puede soportar sin fracturarse cuando está sometido a tensión, expresada en MPa (Megapascal) o N/mm^2 .

El valor promedio obtenido de las 9 probetas de sección 100×100 mm es de $0,176 N/mm^2$, equivalente a $0,176$ MPa. En contraste, la resistencia a tracción de un panel comercial, como Alucobond, es de 45 MPa, un valor significativamente superior.

Para evaluar la resistencia a las cargas de viento, se considera un esfuerzo de succión hipotético, como el que podría ocurrir en un edificio de 5 plantas en Madrid capital ($0,9$ kPa = $0,0009$ MPa), obtenido de la siguiente tabla:

Tabla 9. Estudio viento en zona urbana Madrid.

Normativa	Criterio 1 (Zona)	Criterio 2: Presión dinámica	Criterio 3: Coef. exposición	Criterio 4: Coef. eólico	Criterio 5: Presión estática
<i>CTE DB- SE-AE (∫ 3.3.2)</i>	Zona A	$q_b=0,42$ kN/m ² (período retorno 50 años)	Grado IV (Zona urbana en general, industrial o forestal)	$\theta=45^\circ$, $\alpha=0^\circ$, $A \geq 10m^2$ $h/d=32/21=1,52$ Zona A -> $c_p=-1,2$	$q_e = q_b \times c_e \times c_p =$ $q_e = -0,897$ kPa (0,90 kPa)

Fuente: CTE DB-SE-AE³⁵.

Con base en la cohesión interna obtenida del ensayo a tracción (0,17 MPa), al dividirla por la succión de viento (0,0009 MPa), se obtiene un valor de 188,88. Esto indica que el panel puede resistir una carga 188,88 veces mayor que la generada por el viento.

Aunque estos resultados son prometedores, sería conveniente estudiar la resistencia en maquetas a escala real con fijaciones y subestructuras definidas para una evaluación más precisa.

2.6. ESTUDIO PRELIMINAR DE LA DILATACIÓN TÉRMICA

Se ha realizado una prueba de dilatación térmica de los núcleos RCD con el fin de conocer el valor del coeficiente de dilatación térmica sobre dichos núcleos.

La norma UNE-EN ISO 10545-8 (Baldosas cerámicas. Parte 8: Determinación de la dilatación térmica lineal) establece un método de ensayo para la determinación del coeficiente de dilatación lineal de origen térmico de baldosas cerámicas para un intervalo entre la temperatura ambiente y 100°C, se consideró como referencia, pero no fue posible seguir por circunstancias logísticas su procedimiento. No obstante, se optó como alternativa una exposición al calor 24 h a 80°C como forma preliminar de caracterizar la dilatación del núcleo.

La prueba se ha realizado en el laboratorio DIT del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC).

Las probetas sobre las que se va a medir el coeficiente de dilatación térmica son 3 núcleos de RCD hormigón, 2 núcleos de RCD cerámico y 3 núcleos de RCD mixto.

³⁵ Documento Básico de Seguridad Estructural-Acción en la edificación del Código Técnico de la Edificación (CTE) en España. Este documento establece normativas y criterios técnicos para garantizar la seguridad de las estructuras de los edificios.

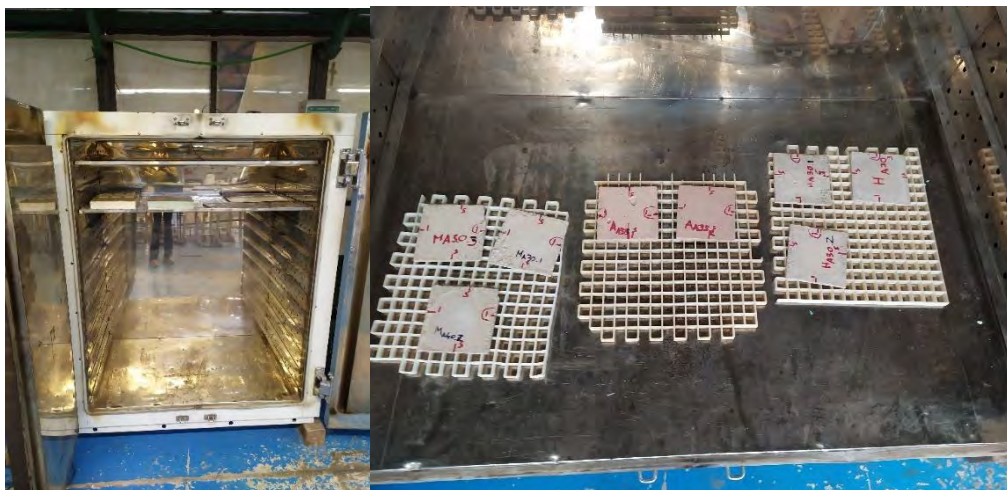
Primero se toman medidas de la anchura, longitud y espesor de cada probeta, esto se realiza con un pie de rey automático, después se colocan las 8 probetas en la estufa a 80°C durante 24 horas, pasadas estas 24h se sacan y se dejan enfriar a temperatura ambiente al menos 15 minutos. Por último, se vuelven a tomar medidas desde los mismos puntos desde donde se tomaron en un inicio. Estas son las medidas tomadas antes y después de la prueba realizada:

Tabla 10. Dilatación Térmica.

Nomenclatura	Antes			Después		
	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
M _{A30(4)}	100,26	100,12	4,32	100,59	100,22	4,27
M _{A30(5)}	100,18	101,26	4,53	100,08	101,24	4,74
M _{A30(6)}	100,65	100,29	4,37	100,73	100,23	4,07
C _{A35(4)}	102,21	99,81	4,91	102,07	99,89	4,95
C _{A35(5)}	99,85	100,62	4,62	99,81	100,65	4,70
H _{A30(4)}	101,46	101,16	5,24	101,40	101,01	5,23
H _{A30(5)}	100,74	100,04	4,54	100,56	99,77	4,43
H _{A30(6)}	101,82	100,95	4,41	101,31	100,78	4,37

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 32. Dilatación Térmica.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla, el incremento de las medidas es nulo, existen pequeñas variaciones que se pueden considerar imperceptibles.

Para calcular el coeficiente de dilatación térmica de un material es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$\alpha_l = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

Donde:

L_0 es la longitud de la probeta a la temperatura ambiente;

ΔL es el incremento de longitud de la probeta entre la temperatura ambiente y $80\text{ }^\circ\text{C}$;

ΔT es el incremento de temperatura.

Como el valor del incremento de la longitud es " $\Delta L \approx 0$ " en todos los casos, se puede concluir que el coeficiente de dilatación térmica de los núcleos de residuos de la construcción y demolición de hormigón, arcilla y mixto se considera nulo.

2.7. ANÁLISIS COMPARATIVO DE PESO/UD.SUPERFICIE

A continuación, se muestra una tabla con la comparación del peso de diferentes marcas comerciales de paneles composite de aluminio con el peso medio de los paneles con núcleo RCD obtenidos. Se han seleccionado los siguientes paneles con núcleo FR o A2 por ser los habitualmente más comercializados en España.

Tabla 11. Comparación de Paneles Composite de Aluminio diferentes marcas.

Marca comercial	Núcleo	Espesor (mm)	Peso (Kg/m ²)
Alucoil	FR	4	7,65
Stacbond	FR	4	7,7
Alucobond	A2	4	7,6
StarModul	A2	4	9,5
Panel RCD obtenido	RCD	4	11,2

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del peso medio de un panel con núcleo RCD se ha tenido en cuenta el núcleo RCD, las láminas de aluminio con acabado espejo y la resina epoxi empleada. El peso de los núcleos de RCD creados varían en torno a 70-80g por probeta, cuya sección es de 100cm², el peso de cada lámina de aluminio con acabado espejo es de 14g, cuya sección es de 100cm² y el peso del adhesivo epoxi empleado total es de aproximadamente 80g, lo que supone que cada probeta cuente con 9g de adhesivo epoxi.

El peso medio de cada panel es de 112g para una sección de 100cm², es decir **11,2 kg/m²**.

La tabla comparativa muestra un peso mayor para el panel con RCD, con una diferencia de hasta 3,6 kg/m² por panel. En términos mecánicos, la estabilidad de la fachada ventilada se sustenta en dos conexiones críticas: la unión de los elementos exteriores a la subestructura y la conexión de la subestructura con la capa interna. Cuando se incrementa el peso de los paneles, es necesario reforzar y asegurar ambas conexiones para garantizar una mayor resistencia y seguridad.

CONCLUSIONES

Con el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado se ha pretendido conocer la viabilidad de la creación y caracterización de un prototipo de panel composite basado en un núcleo capaz de encapsular RCD recubierto por láminas de aluminio con acabado espejo, así como destacar la importancia de la sostenibilidad en la construcción en la actualidad.

A continuación, se describen las conclusiones obtenidas tras la metodología empleada.

Conclusiones generales:

De acuerdo con el análisis previo de la bibliografía, se puede concluir que la legislación europea de los últimos años se preocupa por implementar criterios básicos de sostenibilidad en el ámbito de la construcción, incide en el reciclaje de los Residuos de la Construcción y Demolición y en la utilización sostenible de los recursos naturales.

Además, se concluye que esta legislación mencionada considera la economía circular como el sistema que debe ser apropiado para hacer frente a desafíos globales como son el agotamiento de los recursos naturales o el cambio climático, que afectan directamente al sector de la construcción. En este sentido busca transformar los procesos tradicionales, centrados en la extracción, producción y eliminación de materiales, hacia un enfoque que fomente la innovación en materiales, métodos de construcción y prácticas arquitectónicas para lograr una industria más sostenible y alineada con los principios de cierre del ciclo de vida de los productos.

Por otra parte, el análisis del estado del arte en relación con el empleo del espejo en la arquitectura determina que, a lo largo de la historia, se ha ido intensificando su uso en fachada, con la finalidad de crear imágenes imposibles donde se distorsiona el entorno y se desdibuja el edificio.

Conclusiones particulares:

- En relación al núcleo RCD:

Se puede concluir que sí es posible la creación de un panel composite con núcleo en configuración plana elaborado a partir de una matriz de residuos procedentes de la construcción y demolición, de hormigón y cerámicos, mezclados con cemento natural de rápido fraguado, y revestido con chapas de aluminio con acabado espejo teniendo en cuenta el tiempo y medios de los que se ha dispuesto. Mientras que para el núcleo en configuración en esquina se deben realizar más pruebas para asegurar su estabilidad.

- En relación a la adherencia:

A la luz de la metodología seguida y de los resultados obtenidos se concluye que, por una parte, no es factible el empleo de adhesivo con cianoacrilato como elemento de unión del núcleo RCD con láminas de aluminio por su incapacidad de unión resistente y duradera de ambos materiales. Por otra parte, se concluye que sí puede ser una buena solución el empleo de adhesivo epoxi por los resultados reflejados en el ensayo a tracción, en el que más de la mitad de las probetas sufrieron fallo por sustrato reflejando la eficacia del adhesivo empleado.

En relación al ensayo de tracción realizado para evaluar la adherencia de las láminas de aluminio con acabado espejo al núcleo RCD también se puede concluir que las probetas resistieron un promedio de 1.760 N, siendo las probetas con núcleo RCD cerámico las más resistentes a tracción, con un promedio de 2.242 N, las probetas con núcleo RCD mixto resistieron un promedio de 1.588 N, mientras que las probetas con núcleo RCD de hormigón son las menos resistentes, siendo 1.447 N el valor promedio. Como se ha evidenciado, este resultado muestra una resistencia significativamente menor en comparación con otros paneles composite existentes en el mercado, no obstante, presentan una muy buena cohesión interna. Esto constituye un primer paso favorable para, una vez que se definiera el tipo de fijación, la resistencia frente al viento del sistema de revestimiento de fachadas ventiladas basadas en estos paneles.

Aunque los resultados obtenidos son prometedores, es preciso estudiar la resistencia en maquetas a escala real con fijaciones y subestructuras definidas para una evaluación más precisa. Por otra parte, estos paneles podrían tener aplicaciones más adecuadas en entornos interiores que exteriores.

- En relación a la dilatación térmica:

Tras la prueba de dilatación térmica se concluye que el coeficiente de dilatación térmica de los núcleos de Residuos de la Construcción y Demolición de hormigón, cerámicos y mixtos se considera nulo, tras someterse a una temperatura de 80°C durante 24 horas. Como en el caso de paneles composite trabajan en conjunto las láminas de aluminio y los núcleos RCD, y la dilatación térmica del aluminio tiene un valor de $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, se puede concluir que es posible la formación de tensiones o deformaciones cuando estén expuestos a cambios de temperatura fuertes. Las diferencias en las tasas de expansión y contracción pueden dar lugar a tensiones internas, que, con el tiempo y los ciclos repetidos de temperatura, podrían causar problemas como deformaciones, agrietamientos o desprendimientos. Se concluye que sería necesario utilizar un adhesivo epoxi de bajo coeficiente de dilatación térmica ($15\text{-}20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), esto se logra con la incorporación de mayor contenido en cargas en su composición química.

- En relación al peso:

La comparación de pesos entre diferentes paneles composite para fachada ventilada disponibles en el mercado con el peso del panel creado para este trabajo ha determinado

que, si bien la propuesta desarrollada implica un peso ligeramente superior en comparación con los paneles existentes, la disparidad no es significativa. Este ligero aumento de peso se traduce principalmente en una mayor exigencia en las fijaciones mecánicas y la subestructura necesarias para sostener el panel. Sin embargo, se considera que esta diferencia no compromete la viabilidad ni la eficiencia estructural del panel, representando más bien un factor que requiere una atención adicional en el diseño de las conexiones y soportes.

- En relación con el acabado espejo:

Con la metodología realizada se concluye que es viable la fusión innovadora del núcleo RCD con revestimiento de láminas de aluminio con acabado espejo en un solo panel. La aplicación de este acabado, aunque es inusual en el contexto de materiales reciclados como los RCD, busca demostrar que la innovación estética puede coexistir con prácticas constructivas respetuosas con el medio ambiente. Esta convergencia entre estética y sostenibilidad, especialmente en la utilización de RCD, constituye un elemento distintivo de la propuesta, destacando su contribución tanto a nivel estético como en términos de responsabilidad medioambiental en el ámbito de la construcción.

- En relación a la sostenibilidad de la solución propuesta:

El panel composite propuesto, al ser viable la incorporación de un núcleo de RCD y adoptar un enfoque sostenible en su diseño, se erige como una pequeña contribución al ciclo de vida de los materiales de construcción. Su composición responde a los principios de construcción sostenible y economía circular, alineándose con las propuestas y directrices actuales de la Unión Europea en materia de construcción sostenible. Además, la reciclabilidad del panel refuerza su compromiso con prácticas medioambientales responsables.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados y conclusiones alcanzadas, se exponen una serie de puntos de gran interés, como propuesta de investigación a futuro, son las siguientes:

- Actualización de DEE para paneles composite de aluminio:

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el panel se alinea con los principios de construcción sostenible y economía circular, en consonancia con las directrices de la Unión Europea. En este contexto, se plantea una línea de investigación enfocada en la actualización del Documento de Evaluación Europea (DEE), con el objetivo de evaluar de manera exhaustiva el rendimiento de los paneles composite desarrollados con residuos de la construcción en relación con sus características esenciales. Esta iniciativa no solo contribuirá al avance del conocimiento en el campo de los materiales sostenibles, sino que

también proporcionará un marco normativo actualizado para respaldar la adopción y aplicación más amplias de soluciones constructivas respetuosas con el medio ambiente.

■ **Probeta en esquina a 90º:**

Para solucionar el aplacado en esquina en fachadas ventiladas sería interesante continuar con los ensayos realizados acerca de la creación de una probeta con un ángulo de 90º, incorporando a su vez, el mismo revestimiento que el empleado para este trabajo, el acabado espejo. Como se muestra en el proceso experimental, además de ser una forma funcional para el cerramiento también puede aportar soluciones novedosas estéticas, provocando distintos juegos de imágenes, especialmente cuando se trata de esquinas interiores que pueden dar lugar a imágenes caleidoscópicas.

■ **Probeta con esquina curva:**

Otra posible línea de investigación sería la posibilidad de creación de una probeta con núcleo RCD con esquina curva, interesante por su modo de fabricación y por su acabado estético.

■ **Otras aplicaciones:**

Los paneles composite de aluminio no solo se emplean como revestimiento de fachada ventilada, también es viable su aplicación en cualquier tipo de fachada, o como revestimiento en espacios interiores, también para rehabilitación de fachadas antiguas, como recubrimiento de pilares o se puede incluir en elementos funcionales y estéticos como los voladizos y marquesinas. En este sentido, sería interesante investigar su aplicación en un edificio ya existente.

■ **Acabado perforado:**

Los paneles perforados ofrecen una serie de beneficios, especialmente en términos de diseño arquitectónico y control ambiental, permiten un control preciso sobre la cantidad de luz natural que ingresa al interior del edificio, ya que la perforación en los paneles puede variar en términos de tamaño, forma y distribución, lo que posibilita ajustar el nivel de iluminación de manera específica. Además, ofrecen la posibilidad de equilibrar la necesidad de privacidad con la transparencia, pueden usarse para crear áreas semiprivadas al tiempo que permiten la entrada de luz. También añaden un componente estético atractivo, los patrones creados por las perforaciones pueden ser utilizados para expresar la identidad arquitectónica del edificio, añadiendo un elemento artístico y distintivo. Es una prometedora línea de investigación que, combinada con el acabado espejo, podría aportar una solución única en el sector.

BIBLIOGRAFÍA

A continuación, se relaciona la bibliografía empleada que ha hecho posible este estudio, así como documentación técnica e información consultada.

Libros, Informes, Tesis Doctorales y Trabajos de Fin de Grado consultados en el presente trabajo:

Adjemian Oria, A., 2011. *TFG La Evolución de las fachadas Ventiladas, nuevos materiales y sistemas constructivos*, Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación.

Aldea Álvarez, I., junio 2017. *TFG Del Reflejo a la Transparencia*, Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, 2017. *Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España Periodo 2011-2015*. RCD Asociación.

Asociación Española de Demolición, descontaminación, corte y reciclaje (AEDED), 2016. *Guía sobre gestión de residuos de construcción y demolición*. Publicación AEDED.

Benito, L. A., 2019. *Evolución Histórica de la Fachada Ventilada*, Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Berge, B., 2009. *The Ecology of Building Materials*. 2 ed. Oxford: Architectural Press.

Del río Fernández, L., enero 2017. *TFG Fachadas Ventiladas. Criterios de Selección*, Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Lahoz Ruiz, E., 2016. Tesis Doctoral *Caracterización de sistemas de fachada ventilada con fijaciones ocultas mecánico adhesivas en paneles compuestos de aluminio*, Madrid: Escuela Técnica Superior de Edificación.

López Villalba, A., 2015. *TFG Retrovisiones: El Espejo como Fenómeno Umbral y Espacial*, Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Martínez Soler, I., octubre 2015. Tesis Doctoral *Relación entre formulación y propiedades adhesivas de resinas epoxi en piedra natural*, Alicante: Universidad de Alicante.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023. *Estrategia Española de Economía circular, España 2030*. Publicaciones del Ministerio para Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Pardal, C., 2006. *Ventilada y ligera: La Fachada*. Barcelona: Bisagra.

Deloitte, S.A., 2017. *Resource Efficient Use of Mixed Wastes*, UE: Comisión Europea.

Prieto, N., 2020. *El espejo como material de Construcción*. Tétonica.

Unión Europea, 2020. *Nuevo Plan de Acción para la Economía Circular de Comisión Europea*. Publicaciones de la UE

Artículos e Información obtenida de páginas web:

3A Composites, 2000. *3AComposites*. [En línea] Disponible en: <https://www.3acomposites.com>
[Último acceso: 5 Diciembre 2023].

ALUBUILD Compañía, s.f. *Alubuild*. [En línea] Disponible en: <https://alubuild.com>
[Último acceso: 28 Diciembre 2023].

ALUSIGN Company, 2000. *Alusign*. [En línea] Disponible en: <https://www.alusigncn.com>
[Último acceso: 23 Diciembre 2023].

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 2014. *CEDEX*. [En línea] Disponible en: <https://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/> [Último acceso: 5 Diciembre 2023].

Construible, 2023. <https://www.construible.es/>. [En línea] Disponible en: <https://www.construible.es/materiales-sostenibles>
[Último acceso: 29 Diciembre 2023].

Documento de Idoneidad Técnica nº 405pt/22, 2023. https://dit.ietcc.csic.es/wp-content/uploads/2023/03/report_DITplus_405pR-22-vf.pdf. [En línea] Disponible en: <https://dit.ietcc.csic.es/>. [Último acceso: 29 diciembre 2023].

Economía Circular, 2022. *Metodologías de Evaluación de Impacto Ambiental*, [En línea] Disponible en: <https://gbce.es/>. [Último acceso: 27 diciembre 2023].

European Assessment Document, 2018. EAD 20210046-00-1201. *Thin metal composite sheet*. [En línea] Disponible en: https://www.eota.eu/download?file=/2017/17-21-0046/for%20ojeu/ead%20210046-00-1201_ojeu2019.pdf. [Último acceso: 10 enero 2024].

Evaluación de Impacto Ambiental, 2023. *Metodología de Evaluación de Impacto Ambiental*. [En línea]. Disponible en: <https://evaluaciondeimpactoambiental.com/> [Último acceso: 27 diciembre 2023].

Fundación Mies Van der Rohe, 2022. <https://www.miesbcn.com/>. [En línea] Disponible en: <https://www.miesbcn.com/prize/awards-2022/>. [Último acceso: 29 diciembre 2023].

Green Building Council España, 2023. <https://gbce.es/base-de-una-construccion-circular-5-beneficios-clave-de-los-aridos-reciclados/>. [En línea]. Disponible en: <https://gbce.es/>
[Último acceso: 26 noviembre 2023].

Haomei Aluminium Co., Ltd., 2023. *Aluminium*. [En línea] Disponible en: <https://www.aluminum-sheet-metal.com> [Último acceso: 30 Diciembre 2023].

Instituto Eduardo Torroja, 2022. <https://www.ietcc.csic.es/>. [En línea] Disponible en: <https://www.ietcc.csic.es/noticias/nace-valrec-para-potenciar-la-economia-circular-en-los-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcd/> [Último acceso: 26 diciembre 2023].

Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, 2020. *Presentación: Economía circular: Casos de Éxitos en edificación*. [En línea] Disponible en: <https://www.itc.cat/webstinar-2020/> [Último acceso: 26 diciembre 2023].

Instituto Tecnológico de la Cerámica, 2021. <https://www.itc.uji.es/>. [En línea] Disponible en: <https://www.itc.uji.es/el-proyecto-sost-rcd-convierte-residuos-de-construccion-y-demolicion-en-recursos-para-una-construccion-mas-sostenible/> [Último acceso: 28 diciembre 2023].

Manual Básico para Fachadas Ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad. Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte CAM Murcia, 2007. [En línea] Disponible en: <https://www.carm.es/>

Meka 3 Mecanizados y Soluciones, 2011. Nueva Colaboración con Elval Colour en la fachada del hipermercado E.Leclerc. [En línea] Disponible en: <https://www.meka3.com/elval-colour-fachada-e-leclerc-chambry/> [Último acceso: 29 diciembre 2023].

Qualicer, Organización Recopilatorio de ponencias, 2010 Documento universitario de ventajas de la fachada ventilada. [En línea] Disponible en: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/2010110.pdf> [Último acceso: 29 diciembre 2023].

Proyecto VALREC, 2023. *Green Building Council España GBCE*. [En línea] Disponible en: <https://gbce.es/>. [Último acceso: 28 diciembre 2023].

Revista Técnica de Medio Ambiente, 2023. <https://www.retema.es/>. [En línea] Disponible en: <https://www.retema.es/actualidad/proyecto-valrec-logra-avances-prometedores-economia-circular-y-reciclaje-de-residuos>. [Último acceso: 26,27 diciembre 2023].

Revista Architecture+Design, 2022. <https://www.architeturaldigest.com/>. [En línea] Disponible en: <https://www.architeturaldigest.com/13stunningexamples-of-reflectivearchitecture> [Último acceso: 26,27 diciembre 2023].

SIKA, 2000. *SIKA España*. [En línea] Disponible en: <http://sika.com> [Último acceso: 28 diciembre 2023].

Sistema Técnicos del Accesorio y Componentes SL (STAC), 2000. *STACBOND*. [En línea] Disponible en: <https://stacbond.com/panel-composite-aluminio-stacbond/> [Último acceso: 5 Diciembre 2023].

Tecnología y Reciclado S.L., 2000. *TecRec*. [En línea] Disponible en: <http://reciclados.net> [Último acceso: 26 Noviembre 2023].

Unidad de Evaluación de Productos y Sistemas Innovadores, 2017. *DIT@ETCC.CSIC*. [En línea] Disponible en: <https://dit.ietcc.csic.es>
[Último acceso: 5 Diciembre 2023].

Normativa aplicable y consultada:

Normativa Europea:

Directiva 2008/98/CE Del Parlamento Europeo y Del Consejo De 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

Directiva (Ue) 2018/851 Del Parlamento Europeo y Del Consejo De 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, del 9 de marzo del 2011, Reglamento de Productos de la Construcción.

Normativa estatal:

Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular

Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (BOE nº 38 de 3/02/2008)

Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del estado

Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron. BOE nº 254 de 21/10/2017

Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (2017-2024)

Plan Nacional Integrado De Residuos (PNIR) 2008-2015 Versión Preliminar

Normativa Autonómica:

Orden 2726/2009, de 16 de julio, por la que se regula la gestión de los residuos de construcción y demolición de la Comunidad Autónoma de Madrid. BOCM de 7/09/2009.

Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (2017-2024), 2017. Comunidad de Madrid.