Estudio integral de valorización de residuos domésticos

Interreg
España - Portugal
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
UNIÓN EUROPEA
UNIÃO EUROPEIA
eCO2 cir
INSTITUTO TECNOLÓGICO
intromac
DE ROCAS ORNAMENTALES Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Contenido

1.- Introducción 2

2.- Vigilancia tecnológica 3

2.1.- Economía circular 3

2.1.1.-Valorización de residuos 4

2.2.- Residuos sólidos 4

2.3.- Marco normativo 6

2.4.- Generación de residuos 7

2.4.1.- Generación de residuos España/Portugal 7

2.4.2.- Sistema de gestión de RSU en Extremadura y Portugal 9

2.4.3.- Materiales recuperados en las plantas de tratamientos 11

2.4.4.- Eliminación y valorización 12

3.- Diseño y desarrollo de Eco-Materiales 14

3.1.- Tratamiento, identificación y clasificación de componentes de RSU 15

3.2.- Valorización de RSU en materiales de construcción 17

3.2.1.- Viabilidad de uso de fracción todo-uno en hormigón convencional 17

3.2.2.- Viabilidad de fabricación de prefabricado de hormigón con RSU 29

3.2.3.- Otros estudios realizados 34

4.- Conclusiones 35

5.- Bibliografía 36

1.- Introducción

El presente informe es uno de los resultados obtenidos en la Actividad 4 "Valorización" del Proyecto de cooperación transfronteriza para la introducción de la economía ecológica y circular mediante la prevención, mejora del reciclaje, de la gestión y de la valorización de residuos, en las regiones de Centro, Extremadura y Alentejo (ECO2CIR), del programa operativo EP - INTERREG V A España Portugal (POCTEP).

Uno de los objetivos que se persigue en el desarrollo del proyecto eCO2CIR, es estudiar la posibilidad de valorizar alguno de los materiales presentes dentro de los residuos sólidos urbanos (RSU). La fracción que se pretende a analizar y estudiar es aquella que no ha podido ser separada previamente para su aprovechamiento y es desechada directamente en el vertedero, buscando una solución a esta problemática. Se trata de aportar información y resultados sobre la viabilidad técnica de utilizar estos residuos procedentes de los RSU, para valorizarlos mediante la fabricación de nuevos materiales de construcción.

Enterrar los residuos sólidos, aunque sea de manera controlada, genera un impacto en nuestro entorno, siendo múltiples las consecuencias que esto tiene para la biosfera:

- *Cambio climático*; los vertederos tienen gran responsabilidad en el calentamiento global del planeta, y por tanto en el cambio climático. Generan y emiten a la atmósfera biogás, una mezcla formada, sobre todo, por gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), dos de los principales gases que intervienen en el fenómeno del calentamiento global. Si no se toman medidas al respecto, los vertederos representarán el 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2025, según el informe ISWA.
- *Incendios o explosiones en el interior de los vertederos*; como consecuencia del metano producido por los residuos de los vertederos. Estas combustiones espontáneas incontroladas generan emisiones de dioxinas, las cuales son muy dañinas para el medio ambiente, sin contar con los efectos nocivos que estas quemas pueden tener sobre los acuíferos a causa de que las membranas de impermeabilización que se ven afectada por el fuego.
- *Contaminación de suelos y aguas*; debido al arrastre de materiales contaminantes que puedan contener los residuos que los vertederos almacenan. Es lo que ocurre con metales pesados como el plomo o el mercurio que se infiltran llegando a la tierra y aguas cercanas de las plantas.
- *Alteración de la fauna*; sobre todo en la migración de las aves. La actividad migratoria de las aves se está viendo modificada algunas regiones debido a que a los animales no les faltan alimento en los vertederos, por lo que prefieren quedarse en el norte antes de emigrar al sur. Además mencionar la problemática de ingerir plásticos, aluminio, cartón, yeso y otros materiales comunes entre los residuos que pueden resultar incluso mortales.
- *Depreciación del entorno*; debido a los malos olores que producen los vertederos, que nos se pueden controlar de forma efectiva y, casi inevitable.

2.- Vigilancia tecnológica

La primera actividad que fue necesario realizar, fue una vigilancia tecnológica del sector de los residuos en la zona EUROACE, con el objetivo de obtener información tecnológica sobre el entorno, además de llevar a cabo la identificación de tendencias y cambios en el sector estudiado.

Se revisa la situación actual de los RSU en la zona de estudio, tanto la generación de los mismos, como el destino prioritario que tiene en la actualidad. Tras esta vigilancia tecnológica se hace una selección de los residuos más frecuentes, más representativos y con menor grado de aprovechamiento de la región EUROACE en diferentes sectores productivos.

2.1.- Economía circular

Se entiende por economía circular un modelo económico basado en el principio de "cerrar el ciclo de vida" de los recursos de forma que se produzcan los bienes y servicios necesarios al tiempo que se reduce el consumo y el desperdicio de energía, agua y materias primas. Este modelo de ciclos cerrados de producción y consumo conserva los recursos naturales y contribuye al desarrollo sostenible.

La economía circular imita a la naturaleza, en la que el sol proporciona la energía, las plantas extraen los materiales que necesitan del suelo, crecen y alimentan a los animales, luego ambos mueren y los nutrientes regresan al suelo, preparados para un nuevo ciclo. Los materiales fluyen dentro de los ecosistemas y los desperdicios de una especie son alimento para otras.

Sin embargo la economía tradicional ha adoptado, hasta ahora, un modelo lineal. Extrae las materias primas del medio natural y las usa para producir objetos que se usan y se tiran con rapidez, de tal manera, que se gasta más de lo necesario para producir, con la consiguiente repercusión sobre nuestro medio ambiente y sobre la economía.

Si se acepta que el modelo natural de ciclo cerrado funciona, se debería pensar en cambiar nuestro modelo económico para que opere bajo el mismo modelo, es decir, para que la producción industrial y la economía de consumo operen dentro de una economía circular.

En una economía circular los recursos naturales (energía, agua y materias primas) se utilizan repetidamente, conservándose dentro de la economía local el mayor tiempo posible. La extracción de materias primas se reduce y, con ella, el impacto ambiental en los países de origen de esos recursos naturales. Dentro de la economía local el impacto ambiental de las actividades económicas también se reduce y desaparecen o se reducen al máximo los vertidos al suelo y la contaminación en el aire y el agua.

2.1.1.-Valorización de residuos

Dentro de la economía circular, una de las prácticas más frecuente llevada a cabo en los tiempos que corren, es la valorización de residuos. Según la Directiva 2008/98/CE de residuos (modificada por la Directiva (UE) 2018/851) es la "operación cuyo resultado principal es que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función particular".

Se diferencia dos tipos de valorización:

- **Valorización energética:** a través de la incineración de residuos se obtiene la energía que proviene de estos materiales. No se necesita grandes extensiones de tierra y se rige por un riguroso control ambiental. Sin embargo, actualmente la Comisión Europea considera que este tipo de valorización está fuera de las estrategias para la mitigación del cambio climático, ya que causa daños a los objetivos ambientales de una economía circular: prevención y reciclaje de residuos.
- **Valorización de materiales sólidos:** es la obtención de nuevos materiales, o el reciclaje de parte de ellos, para evitar el uso de nuevas materias primas. Los materiales que se pueden valorizar son los envases ligeros, el papel y cartón, el vidrio o la materia orgánica. Es este último caso la valorización se hace mediante el compostaje o digestión anaerobia.

Como última opción los residuos que no pueden ser reciclados o valorizados terminan en vertederos controlados donde se eliminan. Según la Ley 22/2011 de residuos, dicha eliminación tiene que ser segura y se debe adoptar unas medidas que garanticen la protección de la salud humana y del medio ambiente.

La valorización de residuos es verdaderamente beneficiosa para nuestro planeta debido a la reducción de la cantidad de residuos (menor cantidad de basura que acaba en los vertederos).

2.2.- Residuos sólidos

Con la idea de centrar el punto de mira en la problemática ambiental generada por los residuos sólidos y la gestión de éstos, es conveniente primero definir que significa un residuo; según Echarri en su libro Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, "un residuo es cualquier tipo de material que esté generado por la actividad humana y que está destinado a ser desechado" (Echarri, 1998).

Otra definición es la que recoge la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial en la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos; "todo lo que es generado, producto de una actividad y no es de nuestro interés, ya sea por acción directa del hombre o por actividad de otros organismos vivos, formándose una masa heterogénea que, en muchos casos, es difícil de reincorporar a los ciclos naturales".

De una u otra forma, todos generamos residuos sólidos, de ahí que se deba cooperar si se desea solucionar los problemas ambientales que estos producen. Por el efecto negativo que tienen los residuos en el medio ambiente, no se puede consentir que su acción se haga persistente. Se necesita del montaje de un sistema de acciones ambientales planificadas, que abarquen desde el momento de la generación del residuo, hasta su disposición final más adecuada. Por tanto es imprescindible tener en cuenta las características de los residuos: socioeconómicas y de volumen, su procedencia, costo de emisión y tratamiento, directrices administrativas y posibilidades de recuperación y comercialización. A este sistema de acciones u operaciones se le conoce como ***Gestión de los Residuos Sólidos Urbano***.

Para la realización adecuada de esta actividad, es fundamental conocer la composición de estos, siendo de especial importancia la clasificación de los RSU según su naturaleza y origen, las características que se derivan de sus propiedades, su composición, así como la etapa del ciclo de vida de estos. Esta información permite tomar decisiones estratégicas para establecer cómo realizar la disposición de los residuos de la mejor forma, ya sea mediante la recuperación de éstos a la cadena de valor o a la disposición final adecuada.

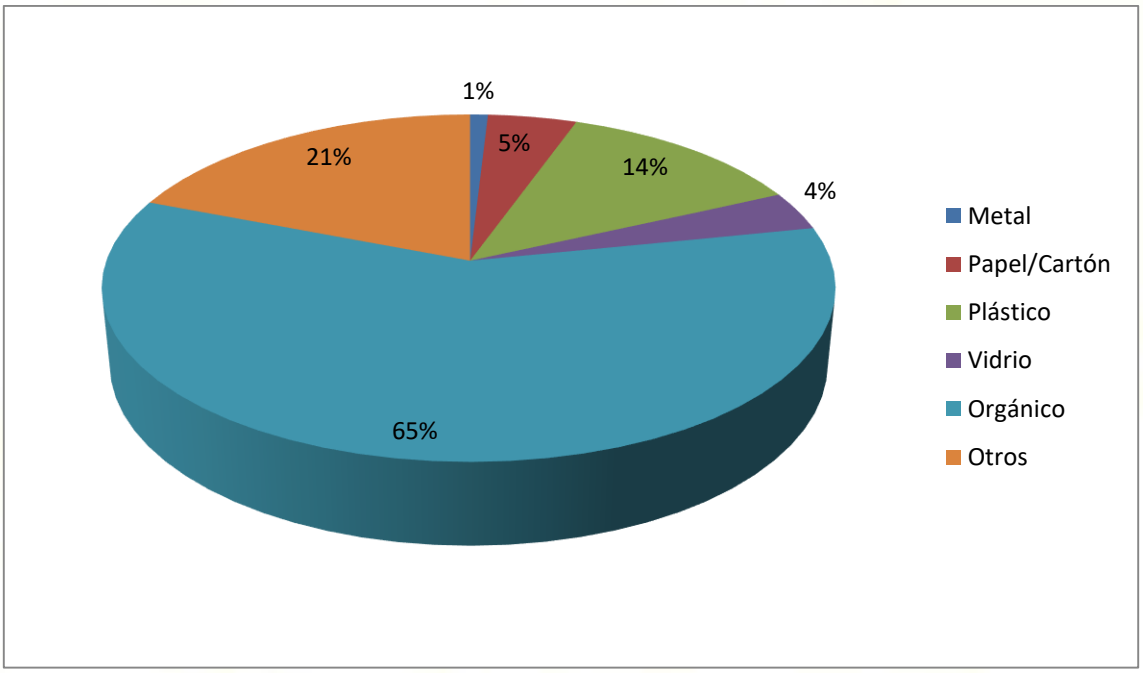


Ilustración 1. Promedio de la composición de los residuos sólidos a nivel mundial (Fuente: Waste Atlas 2013 Report)

Haciendo una revisión a nivel mundial se puede observar que en el promedio de la composición de los residuos sólidos, la mayoría de residuos sólidos generados son de carácter orgánico (43%). Respecto a los sólidos inorgánicos se evidencia que quienes tienen mayor porcentaje de participación en dicha categoría, son el papel o cartón, seguido de plástico, vidrio y metal. De otra parte se identifica un 20,9% de residuos caracterizado como otros, donde se encuentran los residuos peligrosos y/o especiales. Si se analiza la información que se muestra en la ilustración 1, en función de métodos de valorización de los residuos, se puede observar que la gestión de los residuos podría generar valor agregado si se realizan procesos como compostaje

y/o generación de energía a partir de los residuos sólidos orgánicos (Hoornweg, 2013), y procesos de reciclaje de los productos como: plástico, vidrio y metal.

Si estos procesos se ejecutaran de manera conjunta, se podría considerar que los residuos sólidos a disponer serían los que están en la categoría de otros (***TODO UNO***) es decir sólo el 20,9% de los residuos, y quizás sería más fácil realizar su valoración y comercialización.

2.3.- Marco normativo

Durante los próximos años la política de residuos en la zona EUROACE debe girar sobre los elementos claves de la prevención y el reciclado, haciendo un esfuerzo para dar cumplimiento a las nuevas Directivas aprobadas en 2018, que se conocen como "Paquete de Economía Circular".

Además el cumplimiento de la normativas nacionales, la que le concierne a Extremadura con la aún en vigor Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, teniendo como herramientas de orientación y apoyo, tanto el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 como el autonómico, Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2016-2022, además de la legislación portuguesa, el Decreto Ley 102-D/2020, de 10 de diciembre, y los Planes Nacionales que la complementan.

Para llevar a cabo la mejora del modelo de gestión de residuos en la zona EROACE, hay que tener en cuenta los objetivos que establece la normativa a nivel europeo y nacional.

- **Europea:** Se aprueban en 2018 las cuatros Directivas que constituyen el "Paquete de Economía Circular", que modifican anteriores Directivas, y que son las siguientes:
  - Directiva 2018/849, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifican las Directivas 2000/53/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil, la Directiva 2006/66/CE relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y la Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
  - Directiva 2018/850, que modifica la Directiva 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos.
  - 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 (Directiva Marco de Residuos).
  - Directiva (UE) 2018/852 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 94/62/CE, relativa a los envases y residuos de envases.

- **Española/ extremeña:**
  - Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Si bien sigue vigente, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico deberá modificarla para la trasposición de las nuevas Directivas europeas.

- Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y residuos de envases, y por el que se modifica el Reglamento para su ejecución, aprobado por el Real Decreto 782/1998, de 30 de abril.
- Real Decreto 293/2008, de 18 de mayo, sobre reducción del consumo de bolsas de plástico y por el que se crea el Registro de Productores.
- Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos.
- Programas y planes nacionales y autonómicos.
  - ✓ Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.
  - ✓ Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020
  - ✓ Plan Estatal de Inspección de traslado transfronterizos de residuos 2017-2019
  - ✓ Plan Nacional Integral de Residuos de España (PNIR)
  - ✓ Planes y programas de las comunidades autónomas
  - ✓ Plan integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2016-2022. Este plan contiene un programa de prevención de residuos, un apartado dedicado a suelos contaminados y cuatro planes principales de gestión de residuos, incluyendo uno dedicado a otros flujos de residuos que engloba once planes específicos en cada uno de los cuales se establecen objetivos ecológicos y las medidas a adoptar para alcanzarlos.

- **Portuguesa:** Con respecto a la legislación que aplica Portugal con relación a la gestión de residuo encontramos:

- Decreto Ley 102-D/2020, de 10 de diciembre, que aprueba el régimen general de gestión de residuos, el régimen legal para el vertido de residuos y cambia el régimen de gestión para flujos de residuos específicos, transponiendo las Directivas (UE) 2018/849, 2018/850, 2018/851 y 2018/852.
- Al igual que en España Portugal cuenta con unas series de panes y programas nacionales como son:
  - ✓ Plan de Acción para la Economía circular (PAEC).
  - ✓ Plan Nacional de Gestión de Residuos: horizonte 2014-2020.
  - ✓ Plan Estratégicos para los Residuos Urbanos (PERSU 2014-2020).

2.4.- Generación de residuos

2.4.1.- Generación de residuos España/Portugal

La economía española generó 132,1 millones de toneladas de residuos en 2017, el último año del que se poseen datos. La mayor parte llegó de la industria (31,12%), la construcción (26,75%) y los hogares (17,1%). Estas cifras corresponden a la última Memoria Anual de Generación y Gestión de Residuos de Competencia Municipal publicada por el Ministerio de Transición Ecológica.

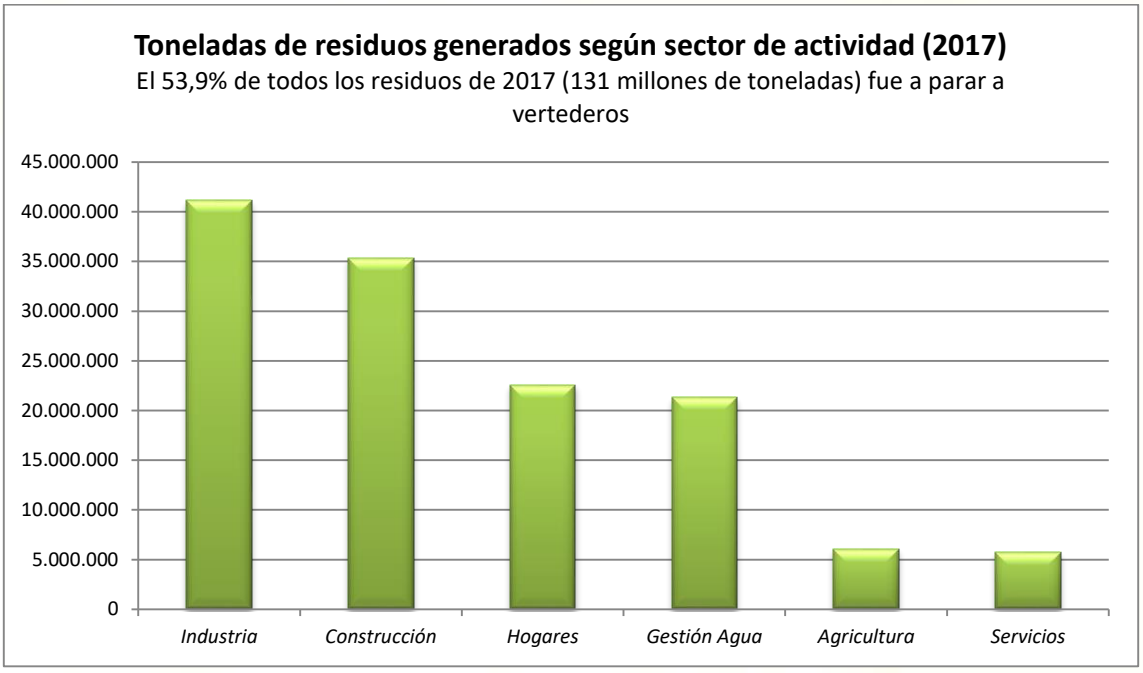


Ilustración 2. Fuente INE, Europa Press

De estos 132,1 millones de toneladas de residuos, los municipios españoles gestionaron 22 millones de toneladas de basura. En este sentido, es importante recordar que los municipios se hacen cargo de la basura procedente de los hogares y del sector servicio (comercio, oficinas e instituciones públicas o privadas), pero no de los residuos comerciales gestionados por canales privados distintos al municipal, ni residuos procedentes de la industria de la construcción.

La responsabilidad de tratar estos residuos es de las empresas que los generan, bien directamente o bien contratando a otra compañía dedicada al tratamiento de residuos. De los 22 millones de toneladas de basura con competencia municipal, aproximadamente la mitad va a parar a vertederos distribuido por todo el país. Los 116 vertederos municipales que había en 2017 en España recogieron 11,7 millones de toneladas de residuos.

Aunque en los últimos años ha aumentado el porcentaje de basura que se recicla (de 29,79% en 2015 a 36,11% en 2017), el porcentaje de basura que se vierte sigue siendo más de la mitad de todos los residuos. Esta cifra varía de una comunidad a otra. Asturias (74%), Aragón (70%), Canarias (70%) y Andalucía (69%) son las comunidades con mayor porcentaje de residuos que acaban en vertederos, siendo en Extremadura el 59% muy cerca aunque superando el 55%, porcentaje mínimo que macó la Unión Europea para 2025.

Del total de residuos, un 53,9% fue a parar a vertederos, según las cuentas ambientales del Instituto Nacional de Estadísticas. De esta manera, España es el país de la Unión Europea que vierte una mayor cantidad de residuos a vertederos.

Con respecto a los datos de Portugal, la generación de RSU durante el periodo 2002-2007 se ha caracterizado por un incremento hasta 2009, seguida posteriormente por un decrecimiento entre 2010-2013 debido a una disminución en el consumo de los ciudadanos como consecuencia

de la crisis económica. Pasado este periodo se observa otro incremento de producción de residuo que continúa hasta 2017, coincidiendo con la recuperación económica y por tanto mayor consumo de la población.

En 2017, Portugal Continental presentó una producción de residuos per capital situada en torno a los 484 kg por habitantes, lo que supone un total de 47 millones de toneladas aproximadamente e igualando la media per capital de la Unión Europea en 2016.

Del total de residuos generados en 2017, el 36,5% se corresponde con residuos orgánicos biodegradable, además del 11,5 % plástico, 10,5% papel/cartón, 7,27% vidrio, 4,01 % textil y 30% de otros tipos de residuos, como pueden ser residuos voluminosos, residuos peligrosos, metales etc.

2.4.2.- Sistema de gestión de RSU en Extremadura y Portugal

En ***Extremadura***, los residuos domésticos y similares son recogidos por las Entidades Locales, generalmente mediante el sistema tradicional de contenedores instalados en áreas de aportación para las cuatro fracciones principales: Fracción resto en contenedor gris o verde, papel y cartón en contenedor azul, envases ligeros en contenedor amarillo, y envases de vidrio en contenedor tipo iglú verde.

Esta recogida la ejecutan los municipios, en algunas ocasiones, de forma individual, con medios propios, y en otras, de forma colectiva, mediante la mancomunidad, con medios de esta. En la mayoría de los casos, la recogida es efectuada por empresas especializadas, que son contratadas por la Entidad Local para realizar dicho servicio.

Particularmente, en la provincia de Badajoz, se localiza PROMEDIO, que es el Consorcio de Gestión de Servicios Ambientales de la Diputación de Badajoz, y es el delegado de los servicios de recogida de residuos en gran número de poblaciones menores de 20.000 habitantes de la mencionada provincia, cuya gestión ha sido delegada por las Entidades Locales para llevar a cabo la optimización y el control del servicio de forma eficiente. A su vez, PROMEDIO subcontrata dicho servicio a diferentes entidades, que realizan dicha actividad de recogida en zonas geográficas concretas. En la provincia de Cáceres, se ha instaurado recientemente el consorcio MASMEDIO, si bien aún no realiza las mismas labores que PROMEDIO.

De cualquiera que sea las formas, los residuos domésticos son entregados, según su procedencia, en cada una de las siete Plantas de Tratamiento de Residuos Domésticos existentes en la Comunidad Autónoma de Extremadura, también conocida como Ecoparques, encontrándose cuatro de ellas en la provincia de Badajoz y tres en la de Cáceres (Badajoz, Mérida, Villanueva de la Serena, Talarrubias, Cáceres, Mirabel y Navalmoral de la Mata).

En los ecoparques se recibe tanto la fracción resto como la de envases ligeros, que son almacenados en zonas separadas y tratadas también de forma separada por una línea específica.

De este tratamiento, se separan distintos materiales, como son: material férrico y no férrico, plásticos de diferentes densidades, así como la materia orgánica, que sigue otro proceso diferente, que veremos en los puntos siguientes.

También se receciona la fracción de **residuos voluminosos**, compuestos fundamentalmente por muebles y enseres, que forman otra fracción importante. Habitualmente los municipios disponen de un servicio especial de recogida domiciliaria de residuos voluminosos.

La fracción **papel-cartón** es recogida en el contenedor azul, por las Entidades Locales, así como por gestores privados en los puntos de mayor generación. ECOEMBES financia a las Entidades Locales el sobrecoste de esta recogida separada de manera similar a como lo hace con la recogida de los envases ligeros.

La fracción de **envases de vidrio** es depositada por los ciudadanos en el iglú verde, y gestionada directamente por ECOVIDRIO, que es quien facilita los datos anuales de cantidades recogidos por comunidad autónoma y por municipio.

Otras recogidas selectivas de residuos domésticos, aunque de menor entidad, son las siguientes: los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), medicamentos y pilas, así como residuos textiles, y aceite de cocina usado.

Con respecto a la gestión de residuo en Portugal, los servicios de gestión de residuos municipales abarcan entre otras fases como la recogida, transporte, clasificación y valorización/eliminación.

Hay un total de 23 entidades de gestión en Portugal, de las cuales 9 pertenece a la zona de EUROACE. Estos sistemas de gestión apuestan por dos objetivos, por un lado el aumento del desvío de residuos de vertedero y por otro el aumento de las cantidades de residuos destinado al reciclaje, los que se ha conseguido mediante inversiones en la optimización de la eficacia de las instalaciones y funcionamiento. En el corto plazo, se espera que la SGRU cuente con infraestructuras de tratamiento de RU que le permitan alcanzar los dos objetivos antes mencionados, aunque aún quedan algunos casos en los que serán necesarias inversiones adicionales o, alternativas, el uso de compartir infraestructura.

En las ***regiones portuguesas***, unos de los objetivos de la política que persigue el Estado portugués a través de su plan de actuación PERSUS 2020, es el aumento de la cantidad de residuos reciclables recogidos selectivamente, acompañado simultáneamente por un aumento en la cantidad de los materiales recogidos selectivamente centrándose en algunos materiales (papel, cartón, vidrio y plástico).

Sin perjuicio de la inversión realizada en los últimos años para incrementar el número de equipos e infraestructuras para la recogida selectiva como son los ecopuntos y los ecocentros. Sin embargo, parece que no se obtuvo los resultados esperados en cuanto a un potencial de las

cantidades de residuos recogidos selectivamente. La definición de un ambicioso objetivo de recuperación de la recogida selectiva para casa SGRU, así como otras acciones recomendadas en PERSUS 2020, que apuntaban a incrementar la deposición selectiva de materiales reciclables, fueron consideradas como un punto de partida para la implementación de soluciones innovadoras que contribuyeran a revertir la tendencia de estabilización de los datos cuantitativos recopilados.

No obstante, y sin perjuicio de la estabilización de los datos cuantitativos selectivamente, durante el año 2019 ya se alcanzó el objetivo de recuperación de la recogida selectiva definido para el año 2020, de tal forma que el objetivo perseguido podrá ser revidado para seguir con la tendencia de aumento de residuos recogido de forma selectiva.

Más de la mitad de SGRU (n=19) recolecta selectivamente un valor aproximadamente del 10% del total de los residuos que se producen. Esta cifra puede generar preocupaciones atendiendo a los objetivos tanto nacionales como comunitarios que se marcaron para 2020, así como la estrategia de la Unión Europea para 2025.

2.4.3.- Materiales recuperados en las plantas de tratamientos

Durante el año 2019 fueron entregadas en los ecoparques de Extremadura un total de 394.753,93 toneladas de residuos de la fracción resto, siendo recuperadas 13.523,10 toneladas de materiales (papel y cartón, vidrio, envases de plástico, metales, y briks), es decir, un 3,43 % del total).

De la fracción envases ligeros entraron en los ecoparques 13.875 toneladas de residuos, siendo recuperadas 7.0009,66 toneladas de materiales (papel y cartón, vidrio, envases de plástico, metales, y briks), es decir, un 50,52 % del total.

De la fracción de voluminosos (muebles y enseres) fueron entregadas en los ecoparques 33.286,64 toneladas de residuos, siendo recuperados 7.194,98 toneladas de madera, es decir, un 21,62 % del total.

De las diferentes fracciones de residuos domésticos recogidas de manera selectiva por los gestores privados autorizados (papel y cartón, vidrio, aparatos eléctricos y electrónicos, aceite comestible, ropa, medicamento y pilas), se ha estimado que la recuperación de los materiales contenidos en estos materiales ha sido del 100 %.

En resumen, de las 524.690 toneladas de residuos domésticos y similares recogidos en Extremadura durante el año 2019, se han recuperado aproximadamente 77.652 toneladas de materiales, es decir, un 14,80% del total de los residuos.

En Portugal continental la distribución de los residuos entre 2015-2019 es la siguiente:

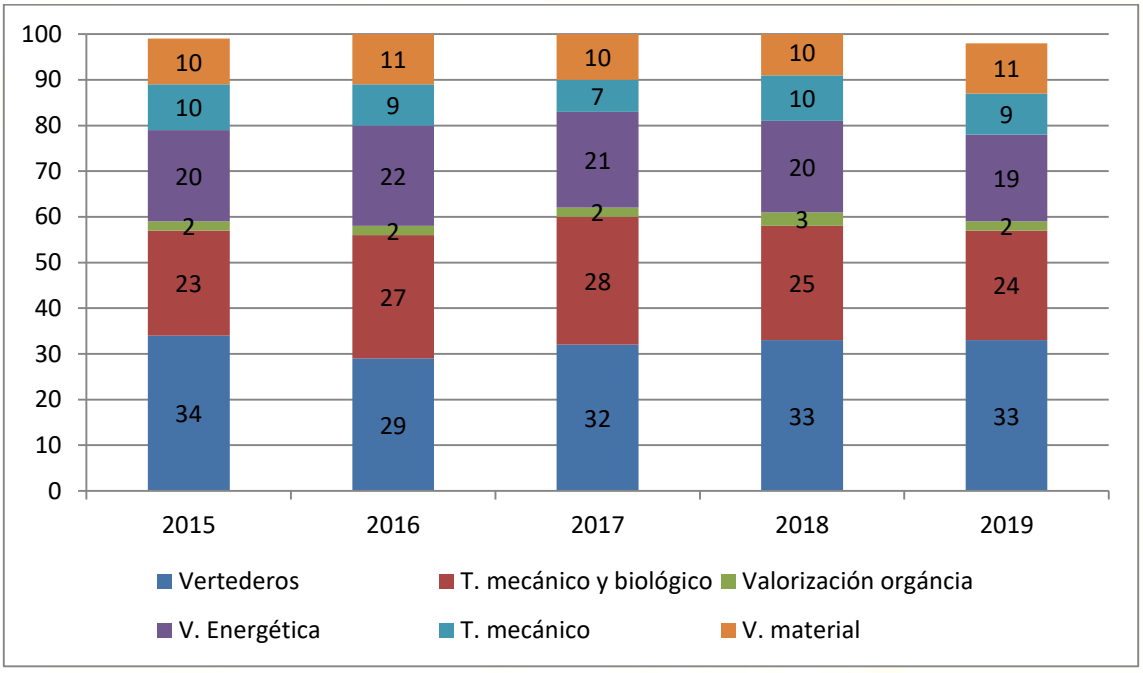


Ilustración 3. Residuos generados en Portugal continental

2.4.4.- Eliminación y valorización

El principal objetivo ecológico en materia de residuos municipales establecido en la ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, por la que se traspuso la Directiva 2008/98/CE, sobre los residuos – hoy modificada por la Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018- indica que antes de 2020, la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, biorresiduos u otras fracciones reciclables deberá alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso.

En los últimos 15 años, desde 2005 en adelante se ha visto un incremento tanto del material reciclado como del compostado, en detrimento de los residuos destinado a vertedero que han pasado del 85% en 2005 al 55% en 2019. En el diagrama de barras de la ilustración 4 se muestra la evolución de residuos domésticos y similares destinados a eliminación y valorización en este periodo.

Como material "valorizado" se considera tanto el reciclaje de diversos materiales, como el material bioestabilizado sometido a compostaje que se origina en las plantas de tratamiento de residuos domésticos y similares. Y por "eliminado" la cantidad de residuos que se han rechazado, tanto en la línea de tratamiento de la fracción resto, como la de la línea de tratamiento de la fracción de envases ligeros, así como del tratamiento de los voluminosos, y de los procedentes de particulares y pequeñas empresas.

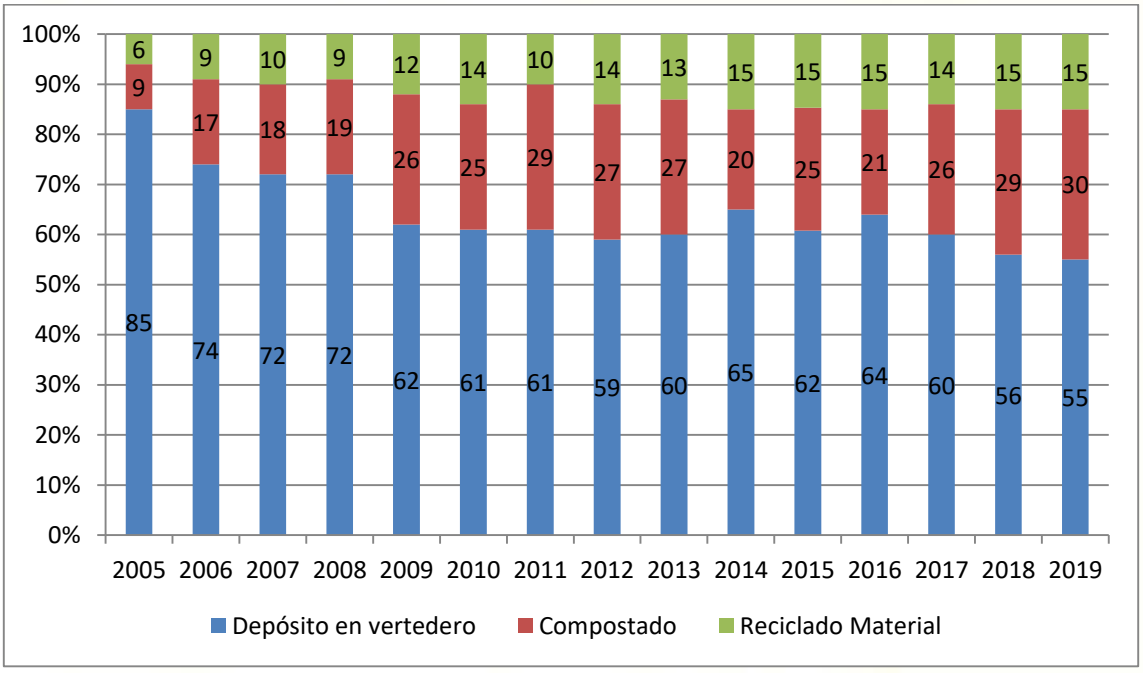


Ilustración 4. Evolución de residuos domésticos y similares destinados a eliminación y valorización

El descenso de residuos destinados a vertederos que se ha mencionado coincide con la entrada en funcionamiento de las distintas instalaciones de tratamiento que, desde el año 2009, componen la red de ecoparques de Extremadura. A partir de ese mismo año, el porcentaje de residuos destinados a vertederos se ha estabilizado en torno al 60%, estando por lo tanto las operaciones de valorización situadas sobre el 40% del total de los residuos domésticos y similares generados.

En 2019, la recuperación de materiales contenidos en los residuos destinados a reciclaje supuso el 14,80 %, mientras que la producción de material bioestabilizado obtenido en los ecoparques mediante el compostaje de la materia orgánica contenida en la fracción mezcla de residuos domésticos se situó en el 30,41 %, incluidas las pérdidas de humedad del proceso. En conjunto, se alcanzó un 45,21 % en peso de residuos domésticos y similares destinados a reciclaje, siendo el vertido del 54,79 %.

Como se puede observar, se ha conseguido lograr de esta forma aproximarse al objetivo de reciclaje del 50% en peso de los residuos municipales destinados a reciclaje fijado para antes de 2020 por la normativa vigente. No obstante, este incremento en los niveles de reciclaje, se ha basado en los dos últimos años en un aumento del material bioestabilizado fabricado en la red de ecoparques de Extremadura, ocasionando un descenso en la calidad, lo que dificulta aún más su comercialización y obliga a utilizar parte del mismo a labores de cubrición de los vertederos de rechazos, en sustitución de áridos naturales.

Desgraciadamente, este aumento en el porcentaje de reciclaje basado en el aumento de la generación de material bioestabilizado no podrá contarse a partir del 1 de enero de 2027, dado que según establece la Directiva 2018/851, que modifica la Directiva 2008/98/CE, sobre los

residuos, a partir de dicha fecha los Estados miembros podrán contabilizar como reciclados los biorresiduos municipales que se sometan a un tratamiento aerobio o anaerobio solo si, han sido recogidos de forma separada o separados en origen.

3.- Diseño y desarrollo de Eco-Materiales

Atendiendo a los sistemas de gestión de los RSU y conocer la problemática de los distintos ECOPARQUES en Extremadura, se establece como objeto del estudio, la valorización en construcción de la fracción denominada RESTO o TODO UNO, actualmente es la fracción cuya única salida es su depósito en vertedero. En el año 2019 en Extremadura esta fracción resultó ser 381.230,83 tonelada.

En esta actividad, se pretende utilizar la fracción de residuo indicado, como posible materia prima en construcción, de tal forma que además de reducir estos residuos en los vertederos, se presenten como una posible alternativa, que minimice el impactos ambiental que conlleva la extracción de ciertas materias primas, en el sector de Construcción.

La metodología planteada para la valorización en diferentes materiales de construcción, requiere como punto de partida, tratamiento previo de desinfección de los residuos, así como de identificación y clasificación de componentes. En el siguiente esquema se exponen los tratamientos realizados atendiendo a las posibles valorizaciones planteadas.

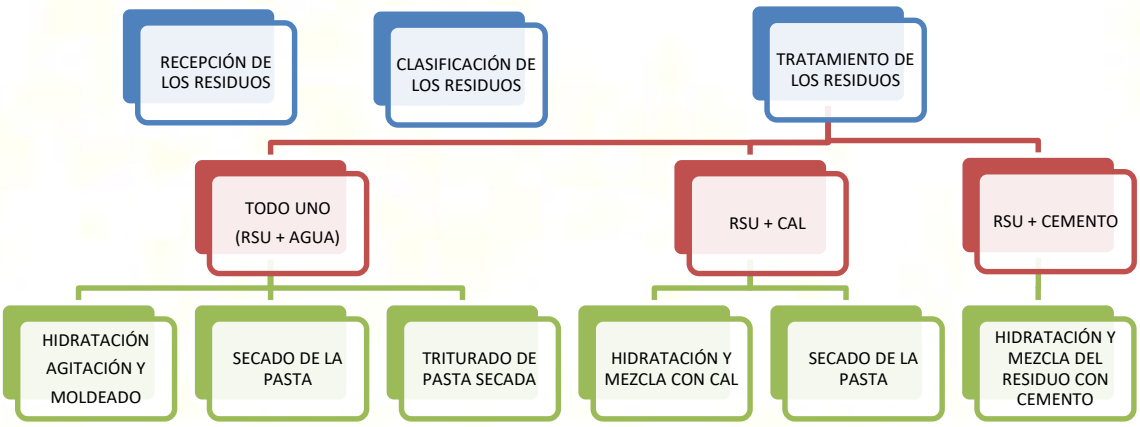


Ilustración 5. Esquema de los diversos tratamientos

3.1.- Tratamiento, identificación y clasificación de componentes de RSU

Actividad 1: Recogida, tratamiento y acondicionamiento de los residuos sólidos urbanos.

Se partió de los RSU previamente sin esterilizar, los cuales se sometieron a una serie de tratamientos de esterilización para eliminar su posible materia infecciosa.

1. Recogida de material TODO-UNO rechazado en Eco-parque de Cáceres.

En un primer lugar tuvo lugar la recogida en paquetes de 1000 m^3como se aprecia en la ilustración 6c. Con ayuda de vehículos autorizados por la Consejería de Medio Ambiente se trasportaron estos paquetes de residuos hasta INTERLUN, S.L. lugar donde tendrá lugar la esterilización. Allí, se comprobó inicialmente el estado de entrada de cada uno de los paquetes para detectar posibles incidencias. Tras la descarga los vehículos se limpian y descontaminan, quedando listo para su próximo servicio.



a) b) c)

Ilustración 6. Recogida material Todo-uno Eco-parque de Cáceres

2. Almacenamiento

Tras finalizar el proceso de admisión, los paquetes se almacenaron en una cámara frigorífica para minimizar la actividad de los microorganismos presentes en este tipo de residuos. Los paquetes se almacenaron un tiempo medio de un día a una temperatura de 4 ºC, permitiendo así mantener un ritmo constante de entrada a los autoclaves (siguiente fase del proceso) y evitando la aparición de malos olores y descomposición.

3. Esterilización de los residuos en autoclave

Al comienzo de la jornada se verificó el correcto funcionamiento de los equipos e instalaciones. Una vez realizada esta operación, los paquetes se cargaron en unos carros metálicos específicos para su introducción en autoclaves (ilustración 7). Estos son alimentados con vapor saturado a 3 bares de presión, por ser este el agente más efectivo en procesos de esterilización.

El ciclo completo de esterilización se realizó de forma automática, siendo constituido por las siguientes fases:

a) Prevacío: se extrae el aire de la cámara con una bomba de vacío para facilitar la penetración del vapor en los residuos a esterilizar. Esta extracción se realiza en varios ciclos de

extracción de aire-admisión de vapor, pues las grandes y rápidas diferencias de presión causan una fuerte corriente de vapor dentro de los contenedores. Este proceso dura unos 30 minutos y consigue abrir y expulsar exitosamente el aire del interior de los contenedores.

b) Incremento de presión y temperatura: durante los siguientes 5 minutos se inyecta vapor hasta alcanza una temperatura de 134 ºC y una presión relativa de 2,2 kg/bar.

c) Esterilización: se mantienen las condiciones de temperatura alcanzados en la fase anterior durante 15 minutos, tiempo muy superior al mínimo establecido para alcanzar el Nivel de Seguridad de Esterilidad.

d) Liberación del vapor: el vapor es extraído de las cámaras y la presión se reduce hasta la atmosférica. Este proceso dura aproximadamente 1 minuto.

e) Secado: al terminar el proceso de liberación del vapor, queda agua residual en la cámara producto de la condensación del vapor en contacto con la carga fría. Para eliminarla se procede a crear de nuevo el vacío en la cámara, reduciendo la temperatura de evaporación del agua para facilitar su transformación en vapor. Este vapor es finalmente extraído, dejando los contenedores secos.

f) Igualación: en esta fase, se permite la entrada de aire en la cámara, hasta que la presión alcanza la atmosférica, finalizando así el ciclo completo de esterilización realizado por autoclaves.



a) b)

Ilustración 7. Autoclaves de esterilización: a) entrada; b)salida

Actividad 2: Separación y clasificación de los residuos

Una vez esterilizados los residuos sólidos urbanos y eliminado cualquier peligro de contaminación biológica, son transportado a INTROMAC donde se realiza el resto de las actividades.

Tras inspeccionar la primera muestra, se descartó la separación automática de los diferentes tipos de residuos, pues al encontrarse tan mezclados, hubiera sido necesario establecer un proceso industrial exclusivo para esta tarea. Es por esto que se decidió realizar la separación y clasificación de forma visual y manual que permite determinar la composición en peso de estos RSU.



a) b) c)

Ilustración 8. Material recepcionado en Intromac

En el siguiente gráfico se expones la clasificación de componentes del material recepcionado y tras su tratamiento de separación manual.

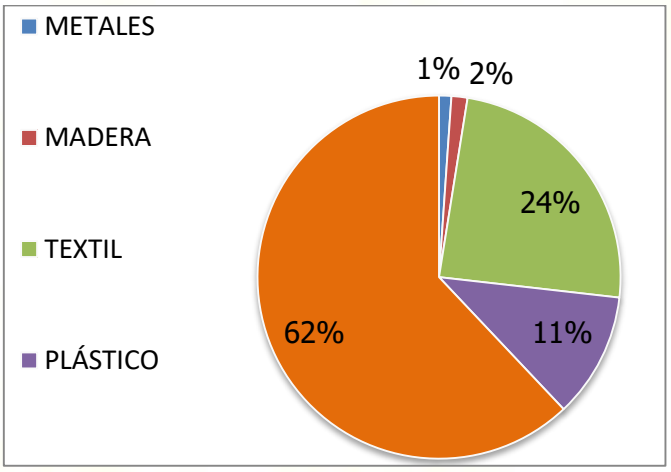


Ilustración 9. Clasificación de componentes

3.2.- Valorización de RSU en materiales de construcción

3.2.1.- Viabilidad de uso de fracción todo-uno en hormigón convencional

El sector de la construcción es un gran consumidor de recursos (materiales y energía), altamente contaminante (emisión de CO_2) y generador de residuos. Por tanto, en la búsqueda de una edificación sostenible, la atención se dirige a la investigación sobre aglomerados de menor consumo energético y al uso adecuado de residuos industriales y agroindustriales.

Con respecto al hormigón es el material compuesto por excelencia, siendo el material de construcción más importante. Sin embargo supone un enorme impacto en el medio ambiente.

Por un lado, están las grandes cantidades de recursos naturales para producir las miles de toneladas al año de los componentes del hormigón, además de la contaminación que supone,

como es la generación de CO_2 que representa el 7% del total liberado por las actividades humanas. Por otro lado, una problemática generada a la larga es la demolición y eliminación de estructuras de hormigón, pavimentos, …, que además de generar una gran carga ambiental, aportan una fracción considerable de los residuos sólidos en los países desarrollados.

En los últimos años, las investigaciones se han centrado en estudiar novedosas temáticas relacionadas con la construcción sostenible. Se han propuesto diferentes herramientas y estrategias para cumplir con los desafíos ambientales marcados, entre las que se encuentra el uso de materiales reciclados en lugar de los recursos naturales, haciendo que la industria sea más sostenible.

Así por ejemplo, el uso de áridos reciclados en la elaboración de hormigón permite solucionar entre otros:

- Problemas de contaminación ambiental.
- Ahorro de energía.
- Consumo de materiales no renovables.

Dentro de los materiales reciclados que se utilizan en los hormigones se encuentran: vidrio reciclado, plásticos, elastómeros de los neumáticos, desechos de madera, residuos agrícolas, metales y otros materiales, que si no se reúsan se acumularían en los vertederos.

En este estudio se examinará la viabilidad de emplear los RSU en hormigón convencional, además de indicar la posible obtención de productos prefabricados utilizados en construcción, con el hormigón diseñado.

El estudio de los hormigones se dividió en dos programas experimentales, en busca de una dosificación y sustitución correcta para productos en base cemento que no tuvieran una función estructural. En el primero, se siguió una dosificación de referencia; en el segundo, se ajustó la dosificación en función de los resultados obtenidos de la primera etapa.

El residuo utilizado tras el tratamiento de esterilización para utilizar en el diseño de hormigón, fue sometido a un tratamiento de eliminación de los componentes minoritarios madera y metales.

Programa experimental (P.E.).

La finalidad de este programa experimental fue estimar en función de la composición del residuo, unos límites de sustitución admisible de árido natural por residuo que cumpliera con unos criterios básicos de diseño. Esto permitiría la fabricación de hormigones, partiendo de residuos sólidos urbanos y desarrollando una dosificación experimental.

Materiales empleados: Los materiales seleccionados para este programa experimental fueron cemento tipo 32,5R, arena de río 0/6 mm como árido fino, grava silícea 12/20mm como árido grueso, agua potable de la red de suministro de la ciudad de Cáceres y el *"Todo 1"*, procedente de los RSU.

Las propiedades estimadas del árido natural fueron la distribución granulométrica, densidad de partícula y absorción de agua.

Dosificaciones

Para determinar las dosificaciones óptimas de hormigón con los residuos se analizaron distintos artículos científicos que estudiaban el uso de residuos como árido para hormigón.

Se optó por realizar el cálculo de las dosificaciones de hormigón con los residuos por un método experimental tal y como se describe a continuación.

- Partiendo de la dosificación de referencia seleccionada, se calcularon los pesos de ésta con los materiales a emplear en nuestro estudio, pues presentaban densidades de partículas diferentes.
- Posteriormente se calculó la cantidad de cada uno de los materiales componentes para un volumen de hormigón determinado.
- A continuación los materiales se pesaron y se substrajo un 20% en peso del árido grueso y se introdujo en recipientes para medir su volumen. Tras esa operación se preparó el volumen de residuos y se pesó.
- Las dosificaciones del hormigón de referencia y con residuos se identificaron como SR (referencia), S1 (Todo Uno, sin metal y madera).

Programa de ensayo

Se implantó un programa de ensayos que necesitó la cantidad de muestra de hormigón, suficiente para fabricar cuatro probetas cúbicas de 100x100x100 mm. Con ellas se pudo realizar el ensayo de resistencia a compresión y el ensayo de densidad en estado saturado, de acuerdo con lo indicado en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Programa de ensayos

Nº Probeta	Ensayo	Norma
1,2	Resistencia a compresión a 7 días	UNE-EN 12390-3:2003
3,4	Resistencia a compresión a 28 días	
1,2	Densidad en estado saturado a 7 días	UNE-EN 12390-7:2009
3,4	Densidad en estado saturado a 28 días	

Fabricación de hormigón

Una vez establecido las dosificaciones adecuadas para los hormigones sujetos de estudio y el programa de ensayos, se llevaron a cabo las amasadas de hormigón correspondientes. En este caso, el volumen total necesario por amasada fue de 5l, realizando una amasada por cada tipo de hormigón, todos los mismos días.

Preparación de los materiales

Los áridos naturales estaban disponibles separados por fracciones en bolsas de plástico cerradas dentro de la nave de almacenamiento de muestras. Estos áridos se encontraban secos tal y como se comprobó según el procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE-EN 1097-5:2009 para la determinación de la humedad en los áridos.

En el caso del residuo, se secó en estufa durante 48 horas hasta peso seco. Al no presentar humedad ni los áridos ni los residuos, no fue necesario realizar corrección por humedad en las dosificaciones obtenidas del hormigón de referencia y los hormigones con residuo.

El cemento también se mantuvo en la nave de almacenamiento de muestras en bolsas de plástico como los áridos naturales.

Amasado

Para la fabricación tanto del hormigón de referencia como de los hormigones con sustitución se empleó una amasadora de albañilería con un volumen aproximado de 7l.

Se comenzó pesando por separado las cantidades necesarias de cada uno de los componentes de los hormigones (cemento, agua, áridos y residuos). El proceso de fabricación de las diferentes muestras de hormigón empleado fue el descrito en la norma UNE-EN 480-1:2007+A1.

Enmoldado, curado y conservación de las probetas

La preparación y conservación de las probetas se realizó siguiendo el método de ensayo descrito en la norma UNE-EN 12390-2:2001 para ensayos de resistencia de hormigón endurecido.

Las probetas se fabricaron por compactación manual con barra y vibrado. Las muestras de hormigón se homogeneizaron previamente mediante una pala, antes del llenado de los moldes de las probetas. Las probetas se compactaron en dos capas. El tiempo transcurrido desde el amasado hasta la fabricación fue suficientemente pequeño para que el hormigón no perdiera trabajabilidad (< 60 min).



Ilustración 10. Enmoldado de probetas (1º P.E.)

Las probetas se marcaron de forma clara y duradera, sin ser dañadas Ilustración 1. Las anotaciones efectuadas se conservaron a fin de asegurar la trazabilidad de la muestra desde la toma hasta el ensayo. Después de retirar las probetas de los moldes se sometieron a un proceso de curado en una cámara a 20 °C ± 2 °C y a una humedad relativa > 95% hasta ser sometidas a ensayos.

Métodos de ensayo

La caracterización de los hormigones fabricados en esta etapa del proyecto se describe a continuación:

- Densidad en estado saturado: los valores de densidad de los diferentes hormigones fabricados en nuestro estudio se obtuvieron siguiendo el procedimiento de ensayo descrito en la norma para hormigón endurecido UNE-EN 12390-7:2009. La determinación del volumen de todos los tipos de probetas se realizó a partir de las dimensiones de moldes calibrados. Las condiciones seleccionadas bajo las cuales se evaluó la densidad en estado saturado fueron en cámara húmeda a 20 °C ± 2 °C y a una humedad relativa > 95%, después de 7 y 28 días de exposición.
- Resistencia a compresión: el ensayo de resistencia a compresión se realizó según la norma UNE-EN 12390-3:2003 para probetas de hormigón endurecido. Las probetas se colocaron en la máquina de ensayo de compresión de tal forma que la carga fuera perpendicular a la dirección de hormigonado y se comprimieron con una velocidad de carga constante. Se registró la carga máxima alcanzada y se calculó la tensión. La máquina de ensayos utilizada para la rotura de las probetas de 150 mm fue una prensa Sistemas de Ensayo con una capacidad máxima de 3000 kN.

Resultados

- Densidad en estado saturado: las densidades en estado saturado en cámara húmeda (20 °C ± 2 °C y humedad relativa > 95%) se presentan en la Tabla 2. Todas las medidas de densidad de los hormigones son la media de dos y tres valores. En la **Tabla 2** también se incluye una medida de la dispersión de los resultados, el recorrido relativo. Este se ha definido como la diferencia entre el mayor y menor valor de los resultados expresado en porcentaje sobre el valor medio de los resultados.

Tabla 2. Resultados de densidad (Kg/m^3)

Tipo de hormigón	7 días	Recorrido relativo (%)	28 días	Recorrido relativo (%)
SR (referencia)	2.300	3,762	2.300	0,352
S1	2.190	1,771	2.220	1,399

Según estos resultados, al introducir residuo en el hormigón, este disminuye su densidad. Esto es debido a que la densidad del hormigón es mayoritariamente la de sus áridos y como se ha

sustituido un porcentaje de estos por el mismo volumen de otro material más ligero (los residuos), la densidad total de la mezcla de hormigón también ha disminuido.

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los hormigones fabricados con sustitución de residuos se compara con la del hormigón de referencia a los 7 y 28 días de edad y sus valores se recogen en la **Tabla 3**. Cada valor es la media de las medidas realizadas en 2 probetas diferentes. En la tabla también incluye el recorrido relativo como medida de dispersión para los tres valores de resistencia obtenidos a los 7 y 28 días de edad.

Tabla 3. Resultados de resistencia a compresión (MPa)

Tipo de hormigón	7 días	Recorrido relativo (%)	28 días	Recorrido relativo (%)
SR (referencia)	40,5	1,140	48,5	9,149
S1	34,0	5,670	39,0	12,800

Se observa que, a los 28 días, el hormigón con la mezcla de residuos presenta una resistencia a compresión un 19.8 % inferior al de referencia.

Ajuste programa experimental (A.P.E)

Los ensayos realizados en el programa experimental anterior permitieron aproximar el comportamiento del hormigón al introducirle los residuos y estimar unos límites en la sustitución para alcanzar una resistencia a compresión requerida. El objetivo principal de esta etapa del proyecto es validar una dosificación óptima de hormigón con residuo del "*Todo 1*" de calidad que permitiera la fabricación posterior de productos de construcción con unos usos definidos, realizando un estudio detallado de propiedades.

Materiales empleados

Los materiales de este programa experimental fueron los mismos que los empleados en programa experimental anterior y que ya han sido descritos.

Dosificaciones

En esta etapa del proyecto, en vista de los resultados obtenido en el programa experimental, dos tipos de dosificaciones de hormigón fueron evaluadas (

Tabla 4). Consintieron en la dosificación de hormigón de referencia S0 (Ref) y el de sustitución parcial de árido grueso fracción 2-12mm, por igual volumen de residuo al 10%, S10.

Tabla 4. Dosificaciones de hormigón

Materiales	Kg/m^3	
	S0 (Ref)	S10
Cemento	426	426
Árido fino	885	885
Árido grueso	931	745
Residuo	0	37
Agua	236	236
Total	**2478**	**2422**

Programas de ensayos

En esta etapa del programa experimental se buscaba realizar una caracterización más exhaustiva del hormigón, teniendo en cuenta las propiedades más influenciadas por la sustitución de árido por residuo y las más relevantes para su aplicación final.

Es por esto, aparte de la resistencia a compresión también se decidió ensayar su resistencia a flexión y conductividad. Estos y el resto de los ensayos programados se recogen en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Programa de ensayos

N.º Probeta	Tipo de probeta	Ensayo	Norma
-	Cono de Abrams	Consistencia en estado fresco	UNE-EN 12350-2:2009
-	-	Densidad en estado fresco	UNE-EN 12350-6:2009
1, 2, 3	Cúbica 150x150x150 mm	Resistencia a compresión a 7 días	UNE-EN 12390-3:2009
		Densidad en estado saturado a 7 días	UNE-EN 12390-7:2009
4, 5	Cúbica 150x150x150 mm	Resistencia a compresión a 28 días	UNE-EN 12390-3:2009
		Densidad en estado saturado a 28 días	UNE-EN 12390-7:2009

6, 7, 8, 9, 10, 11	Cúbica 150x150x150 mm	Conductividad térmica	Procedimiento propio basado en la norma UNE-EN ISO 13787
1, 2, 3	Prismática 275x75x75 mm	Resistencia a flexión a 7 días	UNE-EN 12390-5:2009
4, 5, 6	Prismática 275x75x75 mm	Resistencia a flexión a 28 días	

El volumen total de hormigón a fabricar en cada amasada fue, por lo tanto, de 114 l más un coeficiente de seguridad del 15%: 130 l.

Fabricación del hormigón

Tras conocer las probetas necesarias, se realizó una amasadas de 130 l de hormigón, siguiendo el mismo procedimiento explicado en los experimentales anteriores, con sus fases de: preparación de materiales, amasado, enmoldado, curado y conservación de las probetas (**Ilustración 11**).



Ilustración 11. Amasado de probetas (APE)

Métodos de ensayo

La caracterización de la densidad en estado saturado y de la resistencia a compresión se realizaron siguiendo el mismo procedimiento explicado en los experimentales anteriores pero con probetas de 150x150x150 mm, el resto de los ensayos se detallan a continuación:

- **Consistencia:** la determinación de la consistencia se realizó según el procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE-EN 12350-2:2006 de hormigón fresco. En ella se establece como asentamiento, el descenso producido por el asiento del hormigón cuando se levanta el molde donde éste es compactado (**Ilustración 12**). El ensayo de

consistencia se realizó nada más finalizar el periodo de tiempo establecido para el amasado y se realizado para cada amasada de hormigón.



Ilustración 12. Ensayo de consistencia

- **Densidad en estado fresco:** la densidad del hormigón fresco se determinó según el método de ensayo descrito en la norma UNE-EN 12350-6:2006 de hormigón fresco. Previamente se calibró un recipiente rígido y estanco al agua, para obtener su volumen y se pesó para determinar su masa. El hormigón se compactó manualmente en tres capas en el recipiente. Se aseguró que la barra compactadora no golpeara de forma considerable el fondo del recipiente al compactar la primera capa, ni penetrará de forma significativa en la capa anterior. Se sometió el hormigón a 25 golpes por capa. Con el fin de quitar las burbujas de aire atrapado, después de la compactación de cada capa se golpeó el recipiente con una maza hasta que las grandes burbujas de aire dejaron de aparecer en la superficie y las huellas dejadas por la barra compactadora desaparecieron. Finalmente se pesó el recipiente con el hormigón. Se empleó una balanza Metler Toledo con capacidad máxima de 32100 g y precisión de 1 g.

- **Resistencia a flexión**: el ensayo de resistencia a flexión se realizó según la norma UNE-EN 12390-5:2001 de probetas de hormigón endurecido. Se ensayaron probetas prismáticas de 275x75x75 mm a los 7 y 28 días de edad. Una vez mantenidas las probetas en ambiente de laboratorio éstas se sometieron a un momento flector mediante la aplicación de una carga a través de rodillos superiores e inferiores (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Se registró la máxima carga alcanzada y se calculó posteriormente la resistencia a flexión.



Ilustración 13. Ensayo de resistencia a flexión

- **Módulo de elasticidad en compresión:** la determinación del módulo de elasticidad en compresión se realizó según el método de ensayo descrito en la norma UNE 83316:1996. La determinación de su resistencia a compresión a los 28 días de edad se evaluó en una probeta de 150x150x150 mm. Las superficies de las probetas se prepararon mediante un proceso de pulido. El instrumento utilizado para medir las deformaciones fue un transformador diferencial de variación lineal (LVDT) (**Ilustración 14**) con un sistema de adquisición de datos controlados por ordenador. La tensión se incrementó uniformemente a la velocidad de (0,5+ 0,2) N/mm2 por segundo hasta que la tensión alcanzó el valor de un tercio de la resistencia a compresión. Tres fueron los ciclos de carga-descarga que se aplicaron.



Ilustración 14. Ensayo de módulo de elasticidad: probetas con anillos equipados con trasformadores lineares de variación lineal

- **Análisis medioambiental:** los materiales de la construcción están tradicionalmente basados en recursos naturales. Actualmente, al incluir residuos en el hormigón, en nuestro residuo sanitario, se fomenta la economía circular y minimiza el impacto ambiental que la extracción de recursos conlleva. Por ello, pueden aparecer problemas al incluir el residuo en el hormigón y es que contienen no solamente componentes inertes, sino además, sustancias peligrosas desde el punto de vista medioambiental. Para estimar el efecto medioambiental que tiene el incluir residuos en el hormigón, se realizaron ensayos de lixiviación que han probado ser una herramienta de caracterización indispensable. Hay muchos países que han desarrollado bastante su normativa ambiental y proponen valores de caracterización ambiental máximos y mínimos permitidos de elementos lixiviados y otros que no lo tienen lo suficientemente desarrollado, como el caso de España donde no existe unos valores límites de elementos lixiviados en hormigones.

Resultados

- **Densidad en estado saturado:** las densidades en estado saturado en cámara húmeda (20 °C ± 2 °C y humedad relativa > 95%) se presentan en las **Tabla 6**. Todas las medidas de densidad de los hormigones son la media de dos y tres valores. También se incluye

una medida de la dispersión de los resultados, el recorrido relativo. Este se ha definido como la diferencia entre el mayor y menor valor de los resultados expresado en porcentaje sobre el valor medio de los resultados.

Tabla 6. Densidades estado saturado (Kg/m^3)

Tipo de hormigón	7 días	Recorrido relativo (%)	28 días	Recorrido relativo (%)
S0 (Ref)	2.380	1,117	2.340	0,850
S10	>1.890	5,388	2.030	4,209

Se observó una disminución de la densidad de 12,9 % a los 28 días, mayor a las obtenidas en los programas experimentales anteriores.

- **Resistencia a compresión:** la resistencia a compresión de los hormigones fabricados con sustitución de residuos se compara con la del hormigón de referencia a los 7 y 28 días de edad y sus valores se recogen en la **Tabla 7.** Cada valor es la media de las medidas realizadas en 2 probetas diferentes. También incluye el recorrido relativo como medida de dispersión para los tres valores de resistencia obtenidos a los 7 y 28 días de edad.

Tabla 7. Resistencia a compresión (MPa)

Tipo de hormigón	7 días	Recorrido relativo (%)	28 días	Recorrido relativo (%)
S0 (Ref)	26	1,357	41,5	3,772
S10	22,1	66,163	28,5	24,059

Se observó que, a los 28 días, la resistencia a compresión del hormigón con residuos era un 30 % inferior que la del hormigón de referencia a la misma edad. Esta disminución de resistencia fue superior a la obtenida en los experimentales anteriores.

- **Resistencia a flexión:** la resistencia a flexión de los hormigones fabricados con sustitución de residuos sanitarios se compara con la del hormigón de referencia a los 7 y 28 días de edad y sus valores se recogen en la **Tabla 8**. Cada valor es la media de las medidas realizadas en 2 probetas diferentes. También incluye el recorrido relativo como medida de dispersión para los tres valores de resistencia obtenidos a los 7 y 28 días de edad.

Tabla 8. Resistencia a flexión (MPa)

Tipo de hormigón	7 días	Recorrido relativo (%)	28 días	Recorrido relativo (%)
S0 (Ref)	5	1,761	6,8	13,9
S10	-	-	>2,7	15,44

Se observó que, a los 28 días, la resistencia a flexión del hormigón con residuos sanitarios era un 61,09% inferior que la del hormigón de referencia a la misma edad.

- **Densidad en seco:** las densidades en estado seco tras secar las probetas en estufa (100 °C ± 5 °C y humedad relativa < 1%) se presentan en las **Tabla 9**. Todas las medidas de densidad de los hormigones son la media de dos y tres valores. También se incluye una medida de la dispersión de los resultados, el recorrido relativo. Este se ha definido como la diferencia entre el mayor y menor valor de los resultados expresado en porcentaje sobre el valor medio de los resultados.

Tabla 9. Densidades en estado seco (kg/m^3)

Tipo de hormigón	28 días	Recorrido relativo (%)
S0 (Ref)	2.230	0,571
S10	>1.880	8,358

Se observó una disminución de la densidad de 15,83 % a los 28 días en el orden de magnitud a la obtenida en estado saturado.

- **Módulo de elasticidad:** el módulo de elasticidad de los hormigones fabricados con sustitución de residuos sanitarios se compara con la del hormigón de referencia a los 28 días de edad y sus valores se recogen en la **Tabla 10**. También incluye el recorrido relativo como medida de dispersión para los tres valores de absorción obtenidos a los 28 días de edad.

Tabla 10. Módulo de elasticidad (MPa)

Tipo de	28 días	Recorrido relativo
S0 (Ref)	60,00	5,25
S10	30,50	15,18

Se observó que, a los 28 días, el módulo de elasticidad del hormigón con residuos plásticos era un 48,92 % inferior al del hormigón de referencia.

- **Análisis medioambiental:** a continuación, se detallan los resultados obtenidos de los ensayos de lixiviación realizados al hormigón con residuos según la norma UNE EN 15863:2015.

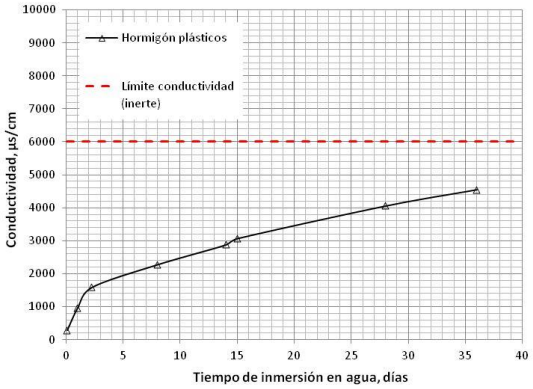


Ilustración 15. Conductividad acumulada

Como se puede apreciar en la figura anterior, la conductividad acumulada no supera el valor límite establecido según la norma DIN 38414, cuyo valor es de 6000 µS/cm. El máximo valor acumulado tras el proceso de ensayo de lixiviación del hormigón es de 2426,6 µS/cm. Estos valores cumplen con la directiva anteriormente descrita, por lo que el hormigón con residuos como sustitutivo al árido natural en un 25%, puede ser considerado como material inerte.

Según la norma la norma UNE EN 15863:2015 se debe realizar también un control de pH durante el proceso de ensayo. En la Tabla 11están reflejados estos valores. En ella se muestra que los valores obtenidos de pH en los intervalos de días establecidos según la norma anterior no son superiores a 12. Estos valores del hormigón están dentro del rango para considerarlo como material inerte según la DIN 38414-S4.

Tabla 11. Valores de pH obtenidos en los ensayos de lixiviación del hormigón

Medida	Intervalo, días	pH
1	0,08	10,71
2	0,92	11,18
3	1,25	11,08
4	5,75	11,37
5	6,00	11,31
6	1,00	10,81
7	13,00	10,9
8	8,00	11,48

Atendiendo a los resultados obtenidos en esta etapa, se evidencia viabilidad técnica de utilizar estos residuos, como sustitución de áridos para hormigones no estructurales. Atendiendo a la revisión bibliográfica realizada, se comprueba que la disminución de resistencias de hormigones con otros residuos investigados, se encuentra en el orden del 30%, valores similares a los obtenidos en este estudio.

3.2.2.- Viabilidad de fabricación de prefabricado de hormigón con RSU

Tras el diseño del hormigón convencional con RSU, se opta por dar un paso más allá y plantear la posibilidad de elaborar un prefabricado, como son bloques de hormigón, de uso no estructural y fabricación no industrial. Los bloques de hormigón, son unos elementos arquitectónicos tradicionales respetuosos e integrados en el ambiente, que constituyen un elemento básico de la arquitectura contemporánea nacional e internacional.

La norma UNE 127771-3, complemento nacional a la norma europea de bloques, los define como una pieza prefabricada a base de cemento, agua y áridos finos y/o gruesos, naturales y/o artificiales, con o sin adiciones y aditivos, incluidos pigmentos, de forma sensiblemente ortoédrica, con una relación, con una relación altura/anchura inferior a 6, y altura/longitud

inferior a 1, sin armadura alguna y con una densidad seca absoluta que suele estar comprendida entre 1.700 kg/m^3 y 2.400 kg/m^3.

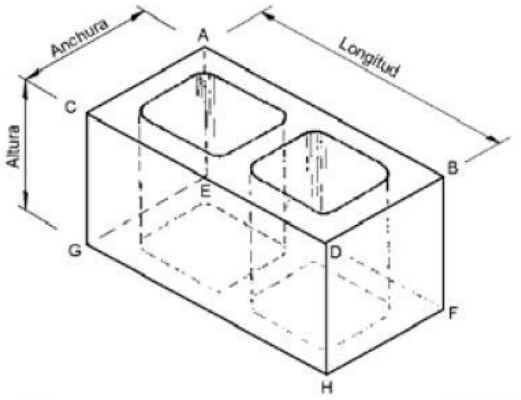


Ilustración 16. Boceto prefabricado de hormigón

Para cualquier modalidad de fabricación de bloques, las etapas son básicamente las siguientes:

- **Selección de materiales y dosificación de la mezcla:** se elige la dosificación óptima que aporte las prestaciones buscada, y se inicia la fabricación de los bloques. Los bloques que se obtiene tienen que presentar las siguientes características:
  - Cohesión en estado fresco para ser desmoldados y transportados sin que se deformen o dañen.
  - Máxima compactación para que su absorción sea mínima.
  - Resistencia esperada según uso y acabado superficial deseado.

- **Elaboración de la mezcla:** se utiliza una mezcladora especial para concreto con la siguiente secuencia: colocar el agregado grueso y las tres cuartas partes del agua a utilizar en la mezcladora y mezclarlo por treinta segundos, luego se adiciona el cemento y finalmente se agrega el resto de agua y arena para completar la mezcla. La dosificación utilizada para esta fabricación ha sido la correspondiente al hormigón diseñado sustituyendo la fracción gruesa de áridos por la fracción "todo-uno", de los RSU.

- **Elaboración de bloques:** primero se revisa que el molde esté en buen estado y limpio. Luego se coloca la tolva alimentadora y se llena. Se aplica la vibración al molde por un promedio de tres segundos para acomodar la mezcla. Si se deja mucho tiempo puede producirse segregación de los agregados. Se vuelve a llenar el molde hasta el ras y se quitan los excesos con la tabla o bandeja. Ésta se puede recubrir con aceite quemado o polvillo selecto para evitar que los bloques se peguen a ella. Se voltea el molde de modo que la tabla o bandeja quede debajo, y se bajan los martillos compactadores antes de aplicar la vibración para que la mezcla se compacte suficiente.

- **Fraguado de los bloques:** los bloques recién fabricados deben permanecer fijos en un lugar que les garantice protección del sol y del viento, con la finalidad de que puedan fraguar sin secarse. Se dejan fraguar hasta que lleguen a una resistencia suficiente para ser manipuladas.



Ilustración 17. Proceso de mezclado y fabricación de bloques

- **Curado de los bloques:** el curado consiste en mantener los bloques, al menos durante los primeros sietes días en condiciones de humedad y temperatura de 17 ºC; necesarias para que se desarrolle la resistencia y otras propiedades deseadas. Una forma de curarlos es recubrirlos con mantas de plástico que formen un ambiente hermético que evite la pérdida de humedad por evaporación. La cobertura con plásticos negros y exposición al sol acelera el desarrollo de resistencia siempre que los bloques se mantengan húmedos.
- **Manejo y almacenaje de bloques:** los bloques deben de manejarse con cuidado, evitar todo tipo de golpes y se almacenan de forma organizada sin afectar a su forma final.
- **Caracterización mecánica:** se realizaron bloques con dimensiones 40 cm de largo, 20 cm de ancho y 14 cm de alto, según el proceso de fabricación detallado anteriormente. Tras 28 días de curado se realizaron las determinaciones del comportamiento de flexión y compresión bajo normativa europea UNE-EN 771-3.



Ilustración 18. Ensayo de compresión

Las superficies de contacto de los bloques con las prensas se prepararon mediante un proceso de pulido, además de hacer uso de neopreno con el fin de que las superficie sean los más homogénea posibles. Iniciado el ensayo la tensión se incrementó uniformemente a la velocidad de (200/s).

- **Ensayo de densidades:** se determinó tanto la densidad absoluta seca y aparente seca de la pieza fabricada, para ello en un primer paso se meten los bloques fabricados antes

de ser roto en el ensayo a compresión en una estufa a 80°C durante 24 h, con el objetivo de secar las piezas.



Ilustración 19. Proceso de secado y determinación del peso de las piezas

Resultado obtenido y discusión.

En la siguiente tabla se recoge las características del bloque de hormigón que se ha diseñado a partir del hormigón convencional previamente estudiado.

Tabla 12. Característica bloque prefabricado







DATOS TÉCNICOS		UNIDAD
Largo	40,0	cm
Ancho	20,3	cm
Medidas nominales	20x14x40	cm
Medidas reales	20,3x14,1x40,0	cm
Peso	11,077	kg
Área neta	459,70	cm^2
Área bruta	812,40	cm^2
Densidad absoluta	1224	Kg/m^3
Densidad aparente	970	Kg/m^3
Resistencia/área neta	2,15	MPa
Resistencia/área bruta	1,2	MPa
% Área neta/Área bruta	56,65	%
Largo alveolo	12,4	cm
Ancho alveolo	11,1	cm
Característica física	**Color/Textura:**	- Gris -Rugoso- - Inclusiones plásticas.
Uso:	Uso no estructural.	

El prefabricado de hormigón fabricado con el hormigón con sustitución de áridos por la fracción "Todo uno" de los RSU, presente una resistencia mecánica adecuada para su uso no estructural. Atendiendo a la norma UNE 127771-3, complemento nacional a la Norma UNE-EN 771-3, los bloques de hormigón de áridos densos suelen tener una densidad seca absoluta comprendida entre 1700 kg/m^3 y 2400 kg/m^3, mientras que los bloques de árido ligeros suelen tener una

densidad seca absoluta inferior a 1700 kg/m^3. El prefabricado obtenido presenta una densidad seca absoluta de 1224 kg/m^3, por tanto se podría a similar a los bloques de áridos ligeros.

3.2.3.- Otros estudios realizados

Atendiendo a la composición del residuo estudiado, mayoritariamente componentes de carácter celulósico, y la revisión bibliográfica de este tipo de materiales en su uso en construcción, se planteo la posibilidad de fabricar un material ligero en base cal con este residuo, para su uso en construcción.

Son varios los autores que han trabajado en el uso de los residuos de carácter celulósico. Shibib (Khalid, 2015) estudió el impacto de la adición de papel residual en el comportamiento térmico y mecánico de los ladrillos de arcilla, obteniendo resultados que mejoraban las propiedades aislantes de estos ladrillos. Olga Kizinievic (Kizinievic, 2018) analiza el efecto de los lodos de desecho de la industria del papel que estos conllevan en las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos de arcilla.

Raut y col. (Raut, 2012) estudió el comportamiento mecánico de ladrillos de desecho de fábricas de papel reciclado confeccionados con un aglutinante de cemento. Los resultados muestran que estos ladrillos se caracterizan por una alta absorción de agua entre el 83,3-108% y una excelente resistencia a compresión comprendida entre 9 MPa.

Rajput y col. (Rajput 2012) estudiaron los ladrillos fabricados por Raut y col (7). Se fija la dosis de cemento y se agrega el desperdicio de algodón en dosis bajas. Estos ladrillos se caracterizan por un comportamiento similar en cuanto a capacidad de absorción de agua, sin embargo la resistencia a la compresión es más interesante que (Raut) variando entre 21 MPa y 23 MPa.

Aigbomian y col (Aigbomian, 2019) fabricó ladrillos que contenían aserrín y papel de desecho con aglutinante a base cal. Obtuvo ladrillos con valores muy bajos de resistencia a compresión (0,06-08 MPa) y conductividad térmica (0,046-0,069 W/m.K).

Aksogan y col. (Aksogan, 2018) combinó papel de periódico de desecho, mimbre y perlita aglutinándolos con yeso. Los resultados muestran que estos ladrillos tienen valores bajos de resistencia a la compresión inferiores a 0,45 MPa y una conductividad térmica baja de menos de 0,1 W/m·K favoreciendo su uso para aislamiento térmico.

Las pruebas realizadas en el laboratorio, se dirigieron a probar diferentes dosificaciones del residuo, conglomerante cal y agua, que nos proporcionara una pasta trabajable con capacidad de endurecer al aire. Para ello, se hicieron pruebas utilizando solo la parte celulósica del residuo, con cal hidratada.

Las pruebas preliminares no se completaron con programas experimentales, tales como los desarrollados en el caso de los materiales en base cemento.



Ilustración 20. Pruebas realizadas en el laboratorio

El material ligero, obtenido tras la dosificación adecuada en los tres componentes utilizados; Agua/Cal hidratada/residuo celulósico, endurece al aire con un retraso significativo en el tiempo de fraguado respecto a los morteros de cal sin residuo y con un aspecto similar a un material tipo “placa de yeso laminado”.

Se puede considerar como un estudio preliminar que plantea la viabilidad de obtener un material ligero a utilizar en construcción, pero debe completarse con un programa experimental que nos permita presentar resultados y conclusiones técnicas, que con lo realizado hasta el momento no se puede hacer.

4.- Conclusiones

En el trabajo desarrollado a lo largo de la ejecución del proyecto, se puede llegar a una serie de conclusiones:

- El tratamiento y la gestión de los RSU´s, tiene una problemática similar en toda la región EUROACE.
- Aunque se ha podido comprobar en la bibliografía consultada que los porcentajes de material aprovechado es cada vez mayor y la selección o clasificación del material que llega a las plantas de residuos es cada vez más efectiva, existe aún un amplio margen de mejora.
- Como recoge este documento, la utilización del todo-uno (o material no aprovechable en las plantas de RSU) en la fabricación de materiales de construcción con nuevas prestaciones (materiales aligerados, aislantes térmicos, aislantes acústico….) es técnicamente viable, previo tratamiento del material.
- Este material todo-uno procedente de las plantas de RSU, debido a sus procedencia y características, requiere de un tratamiento de desinfección o inertización previo, lo que supone una complejidad a la hora de utilizarlo y un gasto asociado que, de momento, haría inviable su aprovechamiento para los usos analizados.
- El contexto normativo en el que nos encontramos, con la nueva Ley de Residuos, en el que se contempla la obligación de la recogida selectiva de biorresiduos, puede favorecer la

viabilidad técnica planteada en dicho informe, para el aprovechamiento de la fracción todo-uno procedente de plantas de RSU, y sumar en el avance hacia una Economía Circular.

5.- Bibliografía

D. Hoornweg, P. Bhada-Tata y C. Kennedy, «Waste production must peak this century,» Nature, pp. 615-617, 2013.

D. Rajput, S. Bhagade, S. Raut, R. Ralegaonkar, S. Madavgane, 2012. Reuse of cotton and recycle paper mil waste as building material. *Constr. Build. Mater.* 34, 470-475.

E. Aigbomian, M. Fan, 2013. Development of Wood.crete building materials from sawdust and waste paper. *Constr. Build, Mater.* 40, 361-366.

G. Tchobanoglous, H. Theissen y R. Eliassen, Desechos Sólidos Principio de Ingenería y Administración, 1982.

Gestión de residuos y economía circular. EAE Business School. Septiembre 2018.

Guía para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos. United Nations Industrial Development Organization, 2007.

Informe sobre la situación de los residuos domésticos y similares producidos y gestionados en Extremadura en 2019. Consejería para la Transición Ecológica y Sostenibilidad. 2020.

J. Rodrigo, M.E. Rodrigo. Alternativas de valorización y eliminación de residuos sólidos urbanos. Industria Ambiente, Octubre 2014.

J.L. Soto, Alternativas de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos. Universidad Politécnica de Valencia 2014.

L. Echarri Prim, Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente, Editorial Teide, 1998

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

O. Aksogan, R. Resatoglu, H. Binici, (2018). An environment friendly new insulation material involving waste newsprintpapers reinforced by cane stalks*, J. Build. Eng.* 15, 33-40.

PERSU 2020. Gabinete do Secretário de Estado de Ambiente, Agência Portuguesa do Ambiente. 2020.

Plan Integrado de Residuos de Extremadura (PIREX) 2016-2022. Diciembre 2016.

Relatório Anual, Resíduos Urbanos 2019. Agência portuguesa de ambiente. Julho 2020

S. Hernández, L.R. Corredor. Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI. 2016.

S. Khalid Shibib, Effects of waste paper usage on termal and méchanical properties of fired brick, J. Heat Mass Trans. 51 (2015) 685-690.

S. Raut, R. Sedmake, R. Ralegaonkar, S. Mandavgane, 2012. Reuse of recycle paper mil waste in energy absorbing light weight bricks. *Constr. Build. Mater.* 27, 247-251.

Proyecto de Ley de Residuos y Suelos Contaminados para impulsar una economía circular y baja en carbono


Interreg
España - Portugal
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
UNIÓN EUROPEA
UNIÃO EUROPEIA
eCO2
cir


intromac
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE ROCAS ORNAMENTALES Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN